SPRITZVERFAHRENSTECHNIK IM TUNNELBAU BEI WASSERHALTUNG DURCH DRUCKLUFT

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum

von

Wolfgang Jörg Schreyer

Hildesheim

Bochum 1981

Arbeit eingereicht am 23.6.81
Tag der mündlichen Prüfung: 27.1.82

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547222_0010

SPRITZVERFAHRENSTECHNIK IM TUNNELBAU BEI WASSERHALTUNG DURCH DRUCKLUFT

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum

von

Wolfgang Jörg Schreyer

Hildesheim

Bochum 1981

Arbeit eingereicht am 23.6.81
Tag der mündlichen Prüfung: 27.1.82

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Forschungsauftrages des BMFT bei der STUDIENGESELLSCHAFT für unterirdische Verkehrsanlagen e. V., - S T U V A -, 5000 Köln 30, Mathias-Brüggen-Str. 41.

Herrn Dr.-Ing. Alfred Haack danke ich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit bei der STUVA.

Herrn Dr.-Ing. Norbert Klawa, Herrn Baudirektor Dipl.-Ing. Josef Weber und Herrn Dipl.-Ing. Heinz Distelmeier danke ich für viele Anregungen.

Insbesondere bedanke ich mich bei den Herren

o. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Maidl,
apl. Prof. Dr.-Ing. Günter Girnau und
Prof. Dr.-Ing. Harald Schorn

für die wohlwollende Unterstützung und die Übernahme der Referate.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Offene Fragen bei der Herstellung von Spritzbeton in Druckluft	2
1.3	Zielsetzung der Arbeit	5
2	Spritzbetonversuche in einer Druckkammer und auf einem Atmosphären-Prüfstand zur Klärung spritzbetontechnologischer Fragen und ergänzende Baustellenversuche	7
2.1	Versuchseinrichtung	7
2.1.1	Allgemeine Anforderungen an die Versuchseinrichtung	7
2.1.2	Abschätzung des erforderlichen Luftdruckes und Luftmengenbedarfes für die Spritzbetonförderung in Druckluft	9
2.1.3	Ausgewählte Konstruktion der Druckluftkammer	25
2.2	Spritzbetonausgangsmischung	29
2.3	Ermittlung der Festigkeitsstreuungen innerhalb des Prüffeldes	34
2.4	Experimentelle Bestimmung des erforderlichen Förderdruckes und Messung des zugehörigen Luftmengenverbrauches für die Spritzbetonförderung	35
2.4.1	Ermittlung des erforderlichen Förderdruckes	35
2.4.2	Messung der verbrauchten Luftmenge	50
2.4.3	Überschlägige Bestimmung des Gesamtdruckverlustes bei der Spritzbetonförderung	56
2.5	Bestimmung des Einflusses von unterschiedlichen Förderdrücken auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons	65
2.6	Ermittlung des Einflusses von verschiedenen Wasserzugabemengen auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons	67

Seite

2.7	Druckfestigkeitsversuche	70
2.7.1	Druckfestigkeitsversuche in der Druckkammer und auf dem Atmosphären-Prüfstand	70
2.7.2	Ergänzende Druckfestigkeitsversuche auf der Baustelle	70
2.7.3	Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche	74
2.7.4	Diskussion der wesentlichen Versuchsergebnisse	86
2.7.4.1	Die Druckfestigkeit des Spritzbetons in Druckluft in Abhängigkeit von der Größe des Umgebungsluftdruckes (1-4 bar absolut)	86
2.7.4.2	Die Druckfestigkeitserhöhung des Spritzbetons, hervorgerufen durch den Differenzdruck zwischen Spritzbetonober- und -unterseite	87
2.7.4.3	Die Druckfestigkeitsminderungen des Spritzbetons infolge von Druckabfällen	97
2.8	Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons	108
2.8.1	Allgemeines	108
2.8.2	Messung der Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons	110
2.8.3	Theoretische Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons	111
3	Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration bei unterschiedlichen Spritzbetontechniken	119
3.1	Allgemeines	119
3.1.1	Gesundheitsgefährdung durch Staub beim Betonspritzen - einige Grundbegriffe	119
3.1.2	Ziel der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration	129
3.1.3	Wahl des Staubprobenahmegerätes	132
3.2	Ergebnisse und Diskussion der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration	135
4	Versuche zur Erhöhung der Frühfestigkeit des Spritzbetons beim Naßspritz-Verfahren im Dünnstrom	166

		Seite
4.1	Allgemeines	166
4.2	Versuchsergebnisse und Schlußfolgerungen	167
5	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	174
5.1	Vorbemerkung	174
5.2	Herstellung von Spritzbeton in Druckluft	174
5.3	Verminderung der Staubentwicklung beim Betonspritzen im Spritzdüsenbereich	178
	Literaturverzeichnis	182

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Spritzbetonbauweisen- besonders in Form der "Neuen Österreichischen Tunnelbauweise" - haben in den vergangenen Jahren im städtischen Bereich bei Tunnelbauten für den ÖPNV und andere kommunale Belange eine vorrangige Bedeutung erlangt. Infolge ihrer Flexibilität weisen sie besonders bei kurzen Verkehrstunneln und Untertagebauwerken mit veränderlichem Querschnitt technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber anderen Bauweisen auf. Ihre Anwendung mit bewehrtem Spritzbeton als alleinigem Ausbaumittel beschränkt sich jedoch im wesentlichen auf temporär standfeste Böden (Mergel, Ton, Schluff, Sande mit bindigen Anteilen). In rolligen Materialien (z. B. Kies) sind zusätzliche Sicherungselemente (z. B. Pfändbleche, Spieße,ggfs. Bodenverfestigung) erforderlich. Die Wasserhaltung erfolgt vorwiegend durch Absenkung des Grundwassers. Nur in Sonderfällen kommen Dichtungswände oder Kombinationen beider Maßnahmen zum Einsatz. Diese Arten der Wasserhaltung haben sich zwar bisher als die kostengünstigsten erwiesen, sie bedingen aber stets nicht nur eine Beeinträchtigung des Grundwasserspiegels, sondern auch eine Inanspruchnahme der Oberfläche. Damit führen sie zu Beeinträchtigungen des Oberflächenverkehrs und sowohl beim Bau als auch beim Betrieb zu Belästigungen der Anlieger. Es stellt sich deshalb die Frage, ob im Zusammenhang mit Spritzbetonbauweisen nicht auch eine Wasserhaltung durch Druckluft Vorteile bietet, und zwar besonders dort, wo ein geringerer Wasserandrang erwartet wird, z. B. bei vorliegendem Schichtenwasser oder einer geringen Tunneltiefenlage, und deshalb hohe Luftdrücke zur Fernhaltung dieses Wassers nicht erforderlich werden. Einer derartigen Kombination zweier Verfahren (Spritzbetonbauweise und Druckluft) steht entgegen, daß die Auswirkungen der Druckluft auf die Spritzbetonbauweise weitgehend unbekannt sind. Zwar wurden bereits Spritzbetonarbeiten zu Reparaturzwecken an Tunnelauskleidungen in Druckluft durchgeführt. Die Frage stellte sich jedoch (z. B. beim U-Bahnbau in München) auch unter dem Gesichtspunkt, den Spritzbeton in großem Umfang als konstruktive Auskleidung zu verwenden. Deshalb sollten vor dieser Anwendung im Rahmen einer

Arbeit eine Reihe von offenen Fragen, insbesondere im Hinblick auf die Arbeitssicherheit (Spritzbetontechnologie und Staub) (s. Kapitel 1.2) bei der Kombination beider Technologien geklärt werden. Die Untersuchung wurde vom U-Bahn-Referat der Stadt München angeregt. Die Durchführung erfolgt im Auftrag des BMFT und mit finanzieller Unterstützung der Stadt München durch die STUVA in Zusammenarbeit mit den Firmen Beton- und Monierbau und Bilfinger + Berger. An dieser Stelle sei der Stadt München und den beiden Baufirmen für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Untersuchung gedankt. Vielen Dank auch den Firmen Aliva (Widen/Schweiz), Atlas Copco (Essen) und Sperno (Neckarzimmern) für ihre Unterstützung.

1.2 Offene Fragen bei der Spritzbetonherstellung in Druckluft

(1) Veränderung der Betoneigenschaften

Bei der Spritzbetonherstellung in Druckluft treten im wesentlichen dazu folgende Fragen auf:

(a) Wenn Spritzbeton in Druckluft auf luftdurchlässigem Untergrund (Gebirge) aufgetragen wird, so durchströmt den Beton je nach seiner Dichtigkeit mehr oder weniger stark Luft bereits im jüngsten Alter. Nach Graf/Albrecht/Schäffer [39] ist die Luftdurchlässigkeit des Betons größer als die Wasserdurchlässigkeit. Und Nischer [26] stellte bei Versuchen eine Abnahme der Wasserdurchlässigkeit von jungem Beton in den ersten 14 Stunden um zwei 10er-Potenzen fest. Geht man aufgrund der Porenausbildung (z. B. Kapillarporen) von einer Analogie zwischen den Gegebenheiten der Wasserdurchlässigkeit und der Luftdurchlässigkeit aus, so zeigt dies deutlich, daß die Luftdurchlässigkeitsangaben aus der Literatur [38], [39], die sich stets auf älteren Beton beziehen, nicht uneingeschränkt auf jungen Spritzbeton übertragbar sind. Durch schnellere Austrockung infolge Luftdurchströmung insbesondere im jungen Alter kann der Spritzbeton u. U. in seiner Dichtigkeit und Festigkeit negativ beeinflu werden.

(b) Der aufgetragene Spritzbeton wird der Luftdurchströmung einen gewissen Widerstand entgegensetzen, so daß z.B. im Sohlbereich der Luftdruck das Grundwasser u.U. nicht mehr vollends verdrängt. In einem solchen Fall führen die Bodenschichten hinter dem jungen Spritzbeton Wasser, das evtl. durch Auswaschungen des Zementes die Betonqualität verschlechtert.

(c) Die Größe der beim Betonspritzen austretenden Luftmenge an der Spritzdüse wird - unter sonst gleichen Voraussetzungen - mit steigendem Luftumgebungsdruck im Düsenbereich geringer, da sich die Luftmenge nur auf den jeweiligen Umgebungsdruck entspannen kann. Da diese Luftmenge die Materialgeschwindigkeit und dadurch die Betondruckfestigkeit (Verdichtung) beeinflußt, werden beim Spritzen in Druckluft größere Ansaugluftmengen für die Auslegung des Kompressors als beim Spritzvorgang in der Atmosphäre erforderlich.
Der Luftmengenbedarf für das Betonspritzen in Druckluft wird in Kapitel 2.1.2 berechnet und in Kapitel 2.4.2 durch Versuche ermittelt.

(d) In Drucklufttunneln kann z.B. durch einen Ausbläser unter ungünstigen Bedingungen der Luftdruck plötzlich abfallen. Hierdurch kann u.U. der nun vorhandene Luftüberdruck in den Luftporen, der dem Luftumgebungsdruck bei der Herstellung des Spritzbetons entspricht, das Gefüge des jungen Spritzbetons zerstören, da sich die in den Luftporen befindliche komprimierte Luft auf den nun niedrigeren Umgebungsluftdruck entspannen möchte. Dabei treten Zugspannungen im Beton auf. Überschreiten sie die jeweilige Betonzugfestigkeit, so ist nach Alexanderson [37] dadurch ein Abfall der Betondruckfestigkeit bis zu ca. 50 % möglich. Die Praxis interessiert neben der Größe der Festigkeitseinbußen auch der kritische Zeitbereich,in dem nach Herstellung des Spritzbetons Schäden durch einen Druckabfall möglich sind.

(2) Staubentwicklung beim Spritzen in Druckluft
Nach der Druckluftverordnung [2] sind die Arbeitskammern u.a. sauber und frei von gesundheitsschädlichen Stäuben zu halten. Beim Betonspritzen entsteht Staub an der Spritzbetonmaschine und im Spritzdüsenbereich. Durch geeignete Maßnahmen wie z.B. Wahl der Spritzbetonmaschine, Kapselung des Spritzmaschinenbereiches, Aufstellung der Spritzbetonmaschine in der Atmosphäre (nur bei kurzen Förderlängen möglich) kann der Staubentwicklung im Maschinenbereich begegnet werden. Besondere Schwierigkeit bereitet hingegen die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich, die vielfach die zulässige Konzentration überschreitet. Deshalb beschränken sich die Untersuchungen dieser Arbeit auf die Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich.

(a) Beim Trockenspritz-Verfahren wird - unter sonst gleichen Bedingungen - nach allgemeiner Auffassung die Staubbelastung vermindert durch:

- eine Zunahme der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung
- den Einsatz einer Vorbenetzung (das Zugabewasser wird hier ca. 4 m vor der Austrittsöffnung des Förderschlauches zugegeben)
- die Wahl eines möglichst niedrigen Förderdruckes (jedoch groß genug, um die Förderung nicht negativ zu beeinflussen).

Diese Einflußparameter wurden bisher noch nicht systematisch untersucht, und führen nicht alle zu den bislang erwarteten Ergebnissen (s. Kapitel 3.2).

(b) Da bisher keine Spritzbetonarbeiten in Druckluft ausgeführt wurden, liegen auch keine Meßergebnisse über die dortige Staubbelastung vor. Der lungengängige Feinstaub verhält sich im Hinblick auf seine Flug- bzw. Schwebeeigenschaften genauso wie in der Atmosphäre (s. Kapitel 3.1.1). Hieraus ist also keine Änderung der Feinstaubkonzentration zu erwarten. Nach Punkt (1) (c), ist aber die ausströmende Luftmeng im Spritzdüsenbereich in Druckluft evtl. geringer

als in der Atmosphäre. Hierdurch könnte eine geringere Verwirbelung der Feinststaubteile und damit eine niedrigere Feinstaubkonzentration in Druckluft bedingt sein (s. Kapitel 3.2).

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ausgehend von den dargestellten offenen Fragen ist es das Ziel dieser Arbeit, Fragen der Spritzbetontechnologie (s.u.) und der Staubbelastung beim Betonspritzen zu klären. Voraussetzung für die Sicherheit der Menschen unter und über Tage ist eine ausreichende Druckfestigkeit des Spritzbetons zur Gebirgssicherung. Deshalb müssen vordringlich folgende Fragen beantwortet werden:

(a) Unter welchen Voraussetzungen kann auch in Druckluft ein Spritzbeton mit gleicher Druckfestigkeit wie in der Atmosphäre hergestellt werden?

(b) Wie wirkt sich eine unterschiedliche Luftdurchlässigkeit des Gebirges auf die Druckfestigkeit des aufgetragenen Spritzbetons aus?

(c) Welchen Einfluß hat gebirgsseitig anstehendes Wasser auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons?

(d) Können Druckluftschwankungen im Tunnel die Druckfestigkeit des Spritzbetons negativ beeinflussen und resultieren daraus evtl. Gefahren für das Personal im Vortrieb?

Zur Klärung obiger Fragen wird die Veränderung der Spritzbetondruckfestigkeit als Indikator herangezogen.

Im Hinblick auf die Gesundheit und Sicherheit der Druckluftarbeiter, deren Organismus durch die Druckluft selbst belastet wird, soll eine zusätzliche Beanspruchung durch Staub beim Betonspritzen möglichst vermieden werden (s. auch [2]). Deshalb sind in diesem Bereich folgende Fragen zu klären:

a) Wie groß ist die Staubentwicklung beim Betonspritzen in Druckluft? Ist sie größer als bei entsprechenden Arbeiten in der Atmosphäre?

(b) Welchen Einfluß hat der Überdruck im Tunnel auf die Staubentstehung an der Spritzdüse?

(c) Welche Möglichkeiten bestehen, den Staub beim Trockenspritzverfahren zu reduzieren?

(d) Entsteht beim Naßspritzen weniger Staub als beim Trockenspritzverfahren?

(e) Welche Möglichkeiten bestehen, den Staub beim Naßspritzen zu reduzieren?

(f) Falls beim Naßspritz-Verfahren im Dünnstrom die Staubbelastung beim Spritzen spürbar geringer ist als beim Trockenspritz-Verfahren, welche Maßnahmen sind dann erforderlich, um die Frühfestigkeit des naßgespritzten Betons für den Einsatz im innerstädtischen Verkehrstunnelbau entsprechend zu erhöhen?

Die angesprochenen Probleme im Zusammenhang mit dem Spritzbeton werden in Kapitel 2 und die Fragen der Staubentwicklung in Kapitel 3 behandelt. In Kapitel 4 werden die Versuche zur Frühfestigkeitserhöhung beim Naßspritz-Verfahren im Dünnstrom beschrieben.

Zusammenfassende Untersuchungsergebnisse in Kapitel 5 sollen auf die wesentlichsten Erkenntnisse dieser Arbeit in Kurzform hinweisen.

2 Spritzbetonversuche in einer Druckkammer und auf einem Atmosphären-Prüfstand zur Klärung spritzbetontechnologischer Fragen und ergänzende Baustellenversuche

2.1 Versuchseinrichtung

2.1.1 Allgemeine Anforderungen an die Versuchseinrichtung

Um den Einfluß des Überdruckes im Arbeitsraum (Tunnel) auf den Spritzbeton untersuchen zu können, ist Voraussetzung, daß die Spritzbetonproben in Druckluft und in der Atmosphäre unter gleichen bzw. vergleichbaren Bedingungen hergestellt und anschließend in derselben Prüfeinrichtung getestet werden. Bei der Schaffung nahezu gleicher Herstellungsbedingungen für den Spritzbeton muß Folgendes berücksichtigt werden:

(1) Ausgangsmischung
Die Einflüsse unterschiedlicher Ausgangsmischungen auf den Spritzbeton können nur gering gehalten werden, wenn beide Spritzbetonproben (in der Atmosphäre und in Druckluft) aus einer gemeinsamen Mischung gespritzt werden. Dies bedeutet, daß am gleichen Tag einmal Spritzbetonproben im Überdruckraum und zum zweiten in der freien Atmosphäre hergestellt werden müssen. Es sind damit ein Atmosphären- und ein Überdruckprüfstand erforderlich.

(2) Prüffeldabmessungen
Beide Versuchsstände müssen geometrisch gleich ausgebildete Prüffelder besitzen. Der Einfachheit halber sollten die Prüffelder so angeordnet werden, wie es einem Spritzvorgang im Ulmenbereich eines Tunnels entspricht, (d.h. vertikale Prüffeldoberfläche). Damit wird bei den Versuchen in der Druckkammer auf die Simulation von Spritzbetonarbeiten im Firstbereich verzichtet.

Nach DIN 18 551 [1] sind zur Bohrkernentnahme (Eignungsprüfung) mindestens Prüfplatten der Größe (Länge x Breite) 50 cm x 50 cm herzustellen, da sonst der negative Einfluß der Randzonen zu groß wird.

Um gänzlich Streuungen der Spritzbetoneigenschaften infolge der Plattenbegrenzungen zu vermeiden, schien ein Prüffeld mit den Abmessungen (Länge x Breite) ca. 1 m x 1 m besser geeignet. Nachteilig ist in diesem Fall jedoch das relativ hohe Eigengewicht des Probekörpers (bei einer Spritzbetonstärke von z.B. 20 cm ca. 500 kg).

(3) Um eine möglichst gleichmäßige Spritztechnik zu erreichen, muß eine feste Spritzposition und Spritzgeometrie gewählt werden (z.B. Abstand Spritzdüse zu Auftragungsfläche 1,50 m). Außerdem sollen alle Spritzbetonproben vom gleichen Düsenführer hergestellt werden.

(4) Spritzbetoneinrichtung
Bei der Herstellung der Spritzbetonvergleichsproben muß in jedem Versuch in der Atmosphäre und in Druckluft mit der gleichen Spritzbetoneinrichtung gespritzt werden. Sie besteht aus der Druckluftstation, der Spritzbetonmaschine, dem Förderschlauch, der Benetzungseinrichtung und der Düse. Dies bedeutet, daß beide Versuchsstände möglichst nah beieinander angeordnet werden müssen.

(5) Kontrolleinrichtungen
Folgende Dinge müssen mindestens bei jedem Versuch überprüft bzw. gemessen und protokolliert werden, um reproduzierbare Versuchsbedingungen zu schaffen:
- Die Ausgangsmischung muß stets geprüft werden auf Kornzusammensetzung, Zementgehalt und Eigenfeuchte (s. Kapitel 2.2).
- Vor Versuchsbeginn muß der entsprechende Förderdruck gewählt, eingestellt und während des Versuches konstant gehalten werden. Dazu wird eine Druckluftregelung benötigt.
- Die beim Spritzvorgang verbrauchte Förderluftmenge muß mit einem Luftmengen-Meßgerät bestimmt werden.
- Um die geforderte Zugabewassermenge genau einstellen zu können, ist eine Wasserstation, bestehend aus Wasserdruckerhöhungspumpe, Druckreduzierventil, Manometer und Durchflußmesser (s. Kapitel 2.2) erforderlich.

2.1.2 Abschätzung des erforderlichen Luftdruckes und Luftmengenbedarfes für die Spritzbetonförderung in Druckluft

Für den Spritzvorgang in der Atmosphäre sind der erforderliche Förderdruck und der Luftmengenbedarf bekannt. Nach Angaben des Herstellers werden für die Rotor-Trockenspritzmaschine bei einem Förderschlauchdurchmesser von 50 mm und einer Förderlänge von ca. 25 m ein Förderdruck von ca. 2 bar bis 4 bar und eine Luftmenge von ca. 10 m^3/min benötigt. Mit Hilfe dieser Angaben kann der erforderliche Kompressor für den Spritzvorgang in der Atmosphäre leicht bestimmt werden. Bei der Herstellung von Spritzbeton in Druckluft muß der Kompressor einmal den jeweiligen Druck im Versuchsraum (Tunnel) und zusätzlich den Förderdruck für die Spritzbetonmaschine zur Verfügung stellen (der Kompressor steht in der Atmosphäre). Bei einem maximalen zulässigen Luftüberdruck im Tunnel bzw. Versuchsraum von 3 bar [2] und einem erforderlichen Überdruck an der Spritzbetonmaschine von ca. 4 bar (wie in der Atmosphäre) für eine Förderlänge von ca. 25 m ergibt sich der erforderliche Betriebsüberdruck des Kompressors zu 7 bar.

Die Bestimmung des Luftmengenbedarfes für die Spritzbetonförderung in Druckluft bereitet etwas größere Schwierigkeiten. Es wird hierbei angenommen, daß der Kompressor in der Atmosphäre steht. Für die nachfolgenden Überlegungen ist es bedeutungslos, ob die Spritzbetonmaschine in der Atmosphäre oder im Druckluftbereich (Tunnel) aufgestellt wird.
Um auch in Druckluft einen Spritzbeton mit gleicher Druckfestigkeit wie in der Atmosphäre herstellen zu können, müssen beide Betone gleichgut verdichtet sein. Dies bedeutet, daß das Material kurz vor der Auftragungsfläche bei atmosphärischem Luftdruck bzw. Überdruck stets die gleiche Geschwindigkeit haben muß.

Da die Berechnung sich wesentlich vereinfacht, wenn der Strömungszustand im Bereich der Spritzdüse betrachtet wird, soll zunächst einmal geprüft werden, inwieweit bei gleicher Materialgeschwindigkeit c im Spritzdüsenbereich die Feststoffteilchen durch den jeweiligen Luftdruck (Luftdichte) im Tunnel bzw. Versuchsraum auf ihrem kurzen Weg von der Düse bis zur Auftragungsfläche (Entfernung ca. 1,50 m) abgebremst werden. Wird ein Feststoffteilchen in ruhende Luft eingeschossen, so gilt für den Luftwiderstand W [19]:

$$W = c_w \cdot \frac{\varrho}{2} c^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \qquad (1)$$

mit c_w = dimensionsloser Widerstandsbeiwert

ϱ = Luftdichte

c = Materialgeschwindigkeit

d = Korndurchmesser

Der Widerstandsbeiwert c_w ist abhängig von der Reynoldzahl Re_s

$$Re_s = \frac{|(v-c)| \; d}{\nu}$$

mit ν = kinematische Viskosität der Luft und

v = Luftgeschwindigkeit.

Es werden folgende Strömungsbereiche unterschieden:

$Re_s \leq 0{,}2$ (Stokesscher Strömungsbereich)

$$c_w = \frac{24}{Re_s}$$

$0{,}2 < Re_s < 1000$ (Übergangsbereich)

$$c_w = 0{,}4 + \frac{26}{Re_s^{0{,}8}}$$

$1000 \leq Re_s < 10^5$ (Newtonscher Strömungsbereich)

$c_w \sim 0{,}4$

Im Stokesschen Strömungsbereich übt die Dichte des Trägergases überhaupt keinen Einfluß auf die

Strömungskräfte aus. Setzt man nämlich in Gleichung (1)

$c_w = \frac{24}{Re_s}$, mit v = 0 (ruhende Luft), so erhält man:

$$W = 3 \pi \varrho \cdot c \cdot \pi \cdot d$$

und mit $\nu = \eta / \varrho$:

$$W = 3 \cdot \eta \cdot c \cdot \pi \cdot d \qquad (2)$$

In Gleichung (2) ist die Luftviskosität η enthalten, die praktisch unabhängig vom Luftdruck (Luftdichte) ist. Für den Stokesschen Strömungsbereich ist bei gleichem Korndurchmesser und gleicher Materialgeschwindigkeit also der Luftwiderstand der Festteilchen in der Atmospähre und in Luftüberdruck gleich.
Für die Korngrößen von ca. 1 mm bis 16 mm wird der Newtonsche Strömungsbereich angenommen. Es gilt hier $c_w = 0{,}4$. Nach [19] gilt für kurze Wegstrecken und unter Vernachlässigung der Gravitation für die Bahngeschwindigkeit c der Feststoffe die Beziehung:

$$c = c_o \exp\left(- \frac{c_w \cdot \varrho \cdot \pi \cdot d^2}{8\, m} s\right) \qquad (3)$$

mit c_w = Widerstandsbeiwert = 0,4

ϱ = Luftdichte [kg/m³]
d = Durchmesser [m]
m = Masse [kg] (ϱ_s = 2650 kg/m³)
s = Flugstrecke = 1,5 m
c_o = Anfangsgeschwindigkeit [m/s]
c = Geschwindigkeit nach der Flugstrecke s [m/s]
(= Geschwindigkeit des Korns kurz vor dem Aufprall)

Aus Gleichung (3) erhält man für kugelförmige Feststoffteile mit

$m = \frac{\pi}{6} d^3 \cdot \varrho_s$, $c_w = 0{,}4$ und s = 1,5 m:

$$c = c_o \exp\left(-0{,}45 \frac{1}{d} \cdot \frac{\varrho}{\varrho_s}\right)$$

Im Bild 2.1/1 ist für verschiedene Luftdichten und unterschiedliche Korndurchmesser d der entsprechende Geschwindigkeitsabfall $\Delta c = c_o - c$ für eine Flugstrecke von 1,50 m bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit aufgetragen. Dabei wird ein einzelnes Korn mit entsprechendem Durchmesser betrachtet (also kein Gemisch), das in einen Raum mit ruhender Luft eingeschlossen wird. Unter diesen Voraussetzungen erkennt man aus Bild 2.1./1, daß

- mit einer Abnahme des Korndurchmessers der Geschwindigkeitsabfall anwächst,
- mit steigendem Luftdruck der Geschwindigkeitsabfall zunimmt und
- der Geschwindigkeitsabfall für Korndurchmesser $\geq$ 9 mm vernachlässigbar klein ist (unter 10 %)

Bei der Spritzbetonförderung handelt es sich aber nicht um ein Einzelkorn, sondern um ein Gemisch mit sehr unterschiedlichen Durchmessern (von ca. 20 µm bis ca. 16 mm).

In Bild 2.1/1 wurde eine gleiche Materialanfangsgeschwindigkeit im Düsenbereich von Fein- und Grobgut angenommen. Das Feingut ist aber bei freiem Flug schneller als Grobgut. Nach Rizk [21] ist der Unterschied bei der Förderung von Feingut zwischen Gas- und Gutgeschwindigkeit klein infolge des geringeren Einflusses der Massenträgheitskräfte. Dies bedeutet, daß die Verhältnisse für die kleineren Körner günstiger sind, als sie in Bild 2.1/1 dargestellt wurden. Außerdem werden die Körner mit großem Durchmesser die kleinen Feststoffteilchen durch Zusammenstöße mit zur Auftragungsfläche reißen. Ferner lagern sich bei der Spritzbetonförderung die Feinstanteile durch die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und das Zugabewasser an

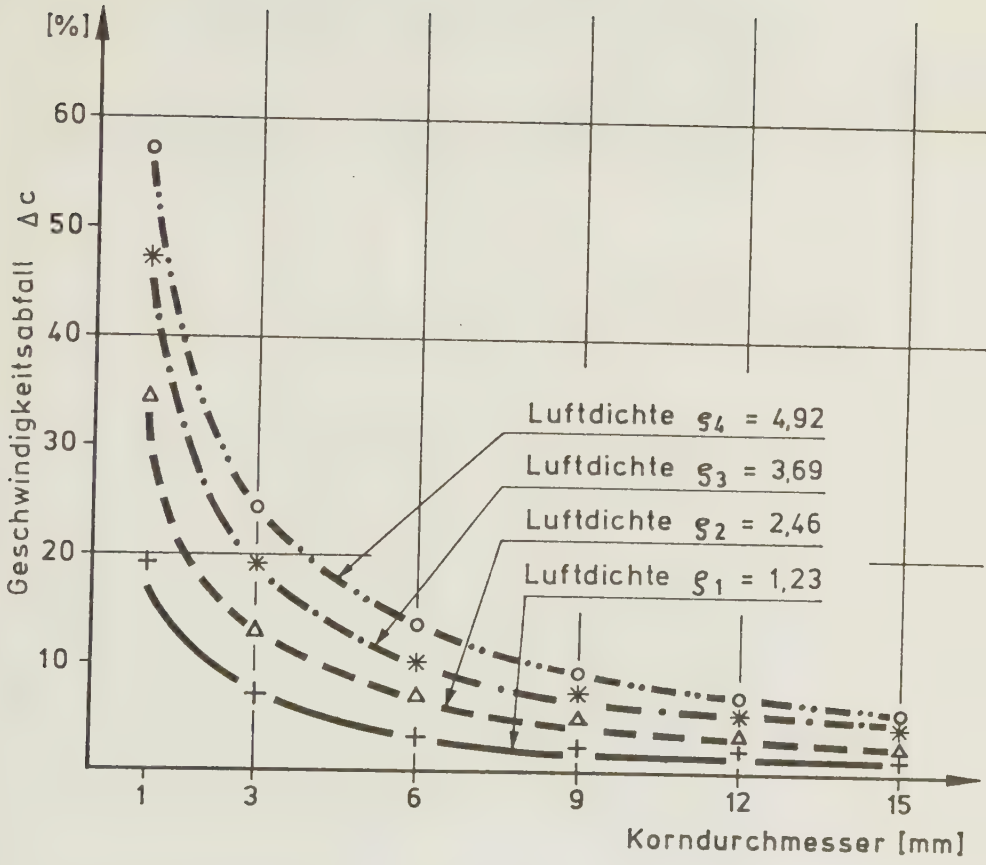


Bild 2.1/1: Geschwindigkeitsabfall kugelförmiger Feststoffteilchen nach 1,5 m Flugbahn, die mit konstanter Geschwindigkeit in einen Raum mit ruhender Luft eingeschossen werden, in Abhängigkeit des Teilchendurchmessers und der Luftdichte

größere Körner an. Nach allgemeiner Auffassung erhält durch diese Wasserbindung der staubfeinen Stoffe die ganze Mischung das Förderverhalten eines überwiegend groben Stoffgemenges . Nach Rapp [20] kann sich auch der Luftwiderstand nicht in vollem Umfang auf dem kurzen Weg von der Spritzdüse bis zur Auftragungsfläche ausbilden.

Für die Verdichtung des Spritzbetons ist die kinetische Energie E_K der Feststoffteilchen kurz vor dem Aufprall maßgebend

$$E_K = \frac{1}{2} m c^2$$

Für ein Feststoffteilchen mit Kugelform erhält man:

$$E_K = \frac{1}{2} \frac{\pi d^3}{6} \varrho_s \cdot c^2$$

Hieraus wird deutlich, daß die Feststoffteile bei den hier auftretenden geringen Geschwindigkeitsunterschieden mit großem Durchmesser für die Verdichtung des Spritzbetons und nicht die mit kleinem Durchmesser entscheidend sind. Die großen Körner werden aber kaum abgebremst. Dieses und die Tatsache, daß eine Spritzbetonförderung stets in gewissen Grenzen schwankt, lassen es als Vereinfachung vertretbar erscheinen, daß die Abbremsung der Mischungsanteile auf ihrem Weg von der Düse bis zur Auftragungsfläche im Hinblick auf die Herstellung eines gleichwertig verdichteten Spritzbetons bis zu einem Luftdruck von 4 bar absolut im Tunnel bzw. Versuchsraum vernachlässigt werden kann.

Es gilt also:

$$c_a = c_d \qquad (4)$$

mit c_a = Materialgeschwindigkeit im Spritzdüsenbereich bei der Spritzbetonförderung in der Atmosphäre

c_d = Materialgeschwindigkeit im Spritzdüsenbereich bei der Spritzbetonförderung in Druckluft

Im Folgenden beziehen sich alle Betrachtungen, wenn nicht ausdrücklich etwas anderes gesagt wird, auf den Spritzdüsenbereich.

Zu einer bestimmten Materialgeschwindigkeit c gehört auch eine entsprechende Förderluftgeschwindigkeit v, durch die das Material im Förderschlauch bewegt wird. Messungen von Lutsch [6] haben für das Betonspritzen in der Atmosphäre mit einer Rotor-Trockenspritzmaschine ein Verhältnis von Materialgeschwindigkeit c zu Luftgeschwindigkeit v im Düsenbereich von i.M. ca. $^{c}/_{v} = 0{,}25$ ergeben. Mit der erforderlichen Luftmenge $Q = 0{,}167\ m^3/s$ für den Spritzvorgang in der Atmosphäre erhält man mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung (isotherme Zustandsänderungen) unter Vernachlässigung der Reibungsverluste

$$Q = v \cdot F \cdot \frac{p}{p_o} \quad [m^3/s] \qquad (5)$$

Q = gesuchte Ansaugluftmenge des Kompressors [m^3/s]
v = tatsächliche Luftgeschwindigkeit im Spritzdüsenbereich [m /s]
F = Querschnittsfläche des Förderschlauches [m^2]
p = Luftdruck im Spritzdüsenbereich $\sim$ Luftdruck im Versuchsraum bzw. Tunnel [bar absolut]
p_o = Luftdruck in der Atmosphäre = 1 [bar absolut]

Bei gegebenem Förderschlauchdurchmesser von 50 mm ($F = 1{,}963 \cdot 10^{-3} m^2$) beträgt die Luftgeschwindigkeit $v \sim 85$ m/s. Hiermit und dem Geschwindigkeitsverhältnis $^{c}/_{v} = 0{,}25$ kann die Materialgeschwindigkeit c im Spritzdüsenbereich beim Spritzvorgang in der Atmosphäre bestimmt werden:

$$c = 0{,}25 \times 85 \sim 21 \text{ m/s.}$$

Diese Materialgeschwindigkeit muß auch bei den Spritzversuchen in Druckluft im Spritzdüsenbereich vorliegen. Bei bekanntem Geschwindigkeitsverhältnis $^{c}/_{v}$ für den Spritzvorgang in Druckluft kann mit

$$c_a = c_d = 21 \text{ m/s}$$

die zugehörige Luftgeschwindigkeit v und daraus die

erforderliche Luftmenge Q bestimmt werden. Aus (5) wird deutlich, daß die Luftmenge Q vom Druck im Versuchsraum linear abhängt. Es wird deshalb bei den nachfolgenden Überlegungen vom maximal zulässigen Druck im Tunnel bzw. Versuchsraum von 4 bar absolut entsprechend der Druckluftverordnung [2] ausgegangen.

Es gilt also das Geschwindigkeitsverhältnis $^{c}/_{v}$ für den Spritzvorgang in Druckluft rechnerisch abzuschätzen. Bei der Spritzbetonförderung mit Druckluft handelt es sich vereinfachend angenommen um eine Zweiphasenströmung (Beton/Druckluft). Zweiphasenströmungen sind sehr schwierig zu berechnen, da nach Weber [13] folgende Parameter hierauf einen Einfluß haben:

a) das Trägermedium (hier Druckluft)
   Dichte, Druck, Geschwindigkeit, Zähigkeit, Temperatur, bezogendes Zwischenraumvolumen

b) das Fördergut (hier Spritzbeton-Ausgangsmischung)
   Dichte, Korndurchmesser, Kornform, Kornverteilung, innerer Reibwert, Härte, Elastizität, Stoßziffer, Feststoffkonzentration, Gutgeschwindigkeit

c) die Rohrleitung (hier Förderschlauch)
   Rohrlänge, Rohrdurchmesser, Rauhigkeit, räumliche Lage, Krümmung, äußerer Reibwert, Härte, Elastizität, Stoßziffer.

Für die Berechnungsgrundlagen im Bereich der pneumatischen Förderung werden wegen der Vielzahl der Einflußfaktoren vereinfachende Voraussetzungen und idealisierte Annahmen getroffen. Nach Weber [13] sind dies z.B.:

- Quasistationärer Strömungszustand
- Phasengeschwindigkeiten konstant über den Querschnitt
- Feststoffverteilung homogen über den Querschnitt
- Feststoffteilchen gleich groß und kugelförmig
- Zustandsänderungen verlaufen isotherm

Obige Vereinfachungen dürften bei der rechnerischen Erfassung der Spritzbetonförderung strenggenommen nicht gemacht werden, da z.B.

- die Form der Feststoffteilchen sehr unterschiedlich ist. In den Zuschlagsmischungen sind nicht nur gedrungene, sondern teilweise auch flache, plattige Körner anzufinden

- das Fördermaterial unterschiedlich groß ist. Der Durchmesser des Fördermaterials schwankt von ca. 20 µm (Zement) bis 16000 µm (Zuschlagskorn 16 mm)

- das Fördermaterial eine Eigenfeuchte von i.M. ca. 3 % besitzt. Diese Eigenfeuchte kann u.U. die Entstehung einer Klebewirkung des Zementes und gegebenenfalls der Betonzusatzmittel (z.B. Kleber) begünstigen. Außerdem verändert die Eigenfeuchte die Dichte des Fördergutes.

Deshalb sind auch die erforderlichen Förderdrücke und Luftmengen für das Betonspritzen in der Atmosphäre - wegen der dort vorliegenden komplizierten Strömungsverhältnisse - nur rein empirisch bestimmt worden. Für den Spritzvorgang in Druckluft liegen bisher keinerlei Erfahrungswerte vor. Da die maximal erforderliche Luftmenge einen entscheidenen Einfluß auf die Bemessung der gesamten Druckluftanlage hat,
erscheint es dennoch sinnvoll, mit den zur Verfügung stehenden Erkenntnissen bei der Spritzbetonförderung in der Atmosphäre und einfachen Berechnungsansätzen der pneumatischen Förderung (mit der Gültigkeit der oben aufgeführten Idealiserungen) die maximal erforderliche Luftmenge Q beim Betonspritzen in Druckluft grob zu bestimmen.

Für die pneumatische Förderung sind nach Weber [13] folgende drei wesentliche Einflußgrößen zu nennen:

- die Sinkgeschwindigkeit des Festteilchens
- die Fördergeschwindigkeit des Trägermediums und
- die Materialbeladung μ (μ ist das Verhältnis der beiden Massenströme: Feststoff zu Luft)

Mit Hilfe dieser Einflußgrößen und einer Abschätzung des Rohrreibungsbeiwertes λ_g^* soll im folgenden der erforderliche maximale Luftmengenbedarf vereinfachend abgeschätzt werden.

Pneumatische Förderanlagen werden mit Hilfe der Materialbeladung μ nach Weber [14] in drei große Bereiche eingeteilt:

1. Dünnstromförderung bei Materialbeladung $\mu \leq 30$
2. Dichtstromförderung bei Materialbeladung $\mu > 30$
3. Fließförderung und Schubförderung bei maximalen Materialbeladungen

Nach [14] ist diese Einteilung etwas grob, und die Grenzen sind nicht so scharf, aber die Einteilung ist von grundlegender Bedeutung, da die Förderzustände sich in den physikalischen Gegebenheiten wesentlich unterscheiden. Dies bedeutet, daß zunächst einmal die vorliegende Größe der Materialbeladung bei der Spritzbetonförderung bestimmt werden muß.

Die Leistung der eingesetzten Spritzbetonmaschine beträgt ca. 4 m³/h. Bei einer Schüttdichte der Spritzbetonausgangsmischung von ca. 1,7 t/m³ erhält man einen Massenstrom des Feststoffes $\dot{M}_s$ zu

$$\dot{M}_s = 4 \cdot 1{,}7 \cdot 3600^{-1} \sim 1{,}9 \text{ kg/s}$$

Bei einem Luftmengenbedarf für den Spritzvorgang in der Atmosphäre von ca. 10 m³/min ergibt sich der zugehörige Massenstrom der Förderluft $\dot{M}_f$ zu

$$\dot{M}_f = 10 \cdot 1{,}23 \cdot 60^{-1} = 0{,}205 \text{ kg/s}$$

Damit erhält man die Materialbeladung μ:

$$\mu = \frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_f} = \frac{1{,}9}{0{,}205} \sim 9{,}3$$

Da die Materialzugabe durch die Spritzbetonmaschine konstant ist (gleicher Rotor mit gleicher Umdrehungszahl), und nach Gleichung (2) mit wachsendem Überdruck im Tunnel bzw. Versuchsraum der Luftmengenbedarf ansteigt, gilt hier für den Spritzvorgang in der Atmosphäre und in Druckluft:

$$\mu < 10$$

Für $\mu < 10$ liegt nach Weber [13] eine spezielle Form der Dünnstromförderung vor, nämlich eine Flugförderung, bei der die Feststoffteilchen weit genug von einander entfernt sind, um sich gegenseitig nicht zu stören. Es darf bei einer Flugförderung davon ausgegangen werden, daß die Feststoffteilchen gleichmäßig über den Querschnitt der Förderleitung verteilt sind. Es sind deshalb im folgenden die für eine Dünnstromförderung (Flugförderung) gültigen Berechnungsansätze zu verwenden.
Nach Lutsch [6] liegen beim Betonspritzen relativ hohe Froudezahlen vor, so daß nach Günther [15] für das gesuchte Geschwindigkeitsverhältnis c_f/v gilt:

$$\frac{c_f}{v} = \frac{1}{1 + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}} \qquad (6)$$

mit $c/_v$ = Geschwindigkeitsverhältnis von Material zu Luft

W_{so} = ungestörte Einzelkornsinkgeschwindigkeit [m/s]

λ_z^* = Rohrreibungsbeiwert für den Feststoff, der die Stöße der Festteilchen auf die Rohrwand und gegenseitig berücksichtigt.

D = Rohrdurchmesser [m]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

Der Rohrreibungsbeiwert λ_z^* kann nur empirisch bestimmt werden, z.B. nach Muschelknautz [16] durch Messen des Druckabfalles und der mittleren Gutgeschwindigkeit an einer pneumatischen Förderleitung. Auswertungen von Versuchen haben nach [16] ergeben, daß λ_z^* für verschiedene Fördergüter z.T. sehr unterschiedliche Werte annimmt und u.U. auch erheblich vom Werkstoff der Rohrleitung abhängt. Da eine Berechnung von λ_z^* z.B. allei mit Hilfe von Materialkennzahlen bis heute nicht möglich ist, wird λ_z^* hier mit Hilfe der Versuchsergebnisse von Lutsch [6] bestimmt. Um das Geschwindigkeitsverhältnis $c/_v$ für den Spritzvorgang in Druckluft ermitteln zu können, wird vereinfachend angenommen, daß der Rohrreibungsbeiwert λ_z^* beim Spritzvorgang in der Atmosphäre ungefähr demjenigen beim Spritzvorgang in Druckluft entspricht. Dies erscheint deshalb zulässig, da nach Weber [59 λ_z^* im Bereich der Dünnstromförderung meist als nahezu konstant gelten kann. Eine bessere Abschätzung von λ_z^* in Druckluft ist deshalb schwierig, da sich in Gleichung (7) zur Bestimmung von λ_z^* durch die höhere Luftdichte in Druc luft gleich zwei Größen ändern, nämlich die Sinkgeschwindigkeit W_{so} und das Geschwindigkeitsverhältnis $c/_v$. Letzteres wird bei gleicher Materialgeschwindigkeit c und vermutlich kleiner Luftgeschwindigkeit v in Druckluft größer. Die Sinkgeschwindigkeit W_{so} nimmt bei einer Zunahme der Luftdichte nach Wagon [17] jedoch ab.

a) Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes λ_z^* für den Spritzvorgang in der Atmosphäre

Gleichung (6) nach λ_z^* aufgelöst, ergibt

$$\lambda_z^* = \left(\frac{1 - \frac{c}{v}}{W_{so} \cdot \frac{c}{v}} \right)^2 \cdot 2\,D \cdot g \qquad (7)$$

(Bedeutung der verwendeten Bezeichnungen siehe Gleichung (6)).

Da bei der Spritzbetonförderung ein Gemisch (Spritzbeton-Ausgangsmischung) und kein Einzelkorn vorliegt, muß geprüft werden, ob die Sinkgeschwindigkeit dieses Gemisches gleich der Sinkgeschwindigkeit des Einzelkornes in Gleichung (4) gesetzt werden darf. Nach Günther [15] ist dies bei der pneumatischen Förderung mit homogener Kornverteilung zulässig, wenn die Körner einen Abstand vom 3fachen Korndurchmesser d haben. Hierfür ergibt sich nach [15] die maximale Materialbeladung zu:

$$\mu = 8{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \frac{\varrho_s}{\varrho} \cdot c/_v$$

mit $\varrho_s = 2650$ kg/m³ Dichte des Feststoffes (Zuschlag)

$\varrho = 1{,}23$ kg/m³ Dichte der Förderluft im Düsenbereich

erhält man für μ:

$$\mu = 8{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \frac{2650}{1{,}23} \cdot 0{,}25 \sim 15$$

Da für die geplanten Versuche gilt: $\mu \leq 15$, kann vereinfachend also angenommen werden, daß die Sinkgeschwindigkeit des Gemisches etwa gleich der des Einzelkornes entspricht.
Es gilt im Bereich hoher Reynold -Zahlen (Newton-Bereich) für die Einzelkornsinkgeschwindigkeit:

$$w_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d}{c_w} \frac{\varrho_s - \varrho}{\varrho} g} \qquad (8)$$

mit

d	=	Korndurchmesser	[m]
c_w	=	Widerstandsbeiwert	
ϱ_s	=	Dichte des Feststoffes	[kg/m³]
ϱ	=	Dichte der Förderluft	[kg/m³]
g	=	Erdbeschleunigung	[m/s²]

Der Widerstandsbeiwert c_w ist insbesondere von der Reynold-Zahl abhängig:

$$Re_s = \frac{W_s \cdot d}{\nu} \qquad (9)$$

mit W_s = Sinkgeschwindigkeit des Einzelkornes [m/s]
d = Korndurchmesser [m]
ν = kinematische Viskosität der Förderluft [m²/s]

$\nu = \eta \cdot \varrho^{-1}$

Die dynamische Viskosität η beträgt bei 15 ° C etwa $1{,}8 \cdot 10^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2}$. Damit erhält man bei atmosphärischem Luftdruck: $\nu = 14{,}6 \cdot 10^{-6}$ m²/s

Bei der Bestimmung des mittleren Korndurchmessers der Spritzbetonausgangsmischung bleibt der Zementanteil aus folgenden Gründen unberücksichtigt:

- Der Zement besteht nach [48] aus Teilchendurchmessern von ca. 3 µm bis 100 µm. Ohne die Berücksichtigung dieser Feinstanteile erhält man einen etwas größeren Feststoffdurchmesser. Da grobes Material pneumatisch schwieriger zu fördern ist als feines, werden die so ermittelten Leistungsreserven ein wenig größer ausfallen (sichere Seite).

- Ein Großteil des Zementes wird sich ohnehin infolge der Eigenfeuchte des Zuschlages an diesem anlagern, so daß er sich während der Spritzbetonförderun nicht mehr vom Zuschlag trennt.

Für den mittleren Korndurchmesser kann deshalb nach [13] d Durchmesser der verwendeten Sieblinie B_{16} gewählt werden, bei dem der Siebdurchgang ca. 50 % beträgt. Nach Bild 2.2 ist dieser Durchmesser d ~ 3 mm.

Für den Newton-Bereich $1000 \leq Re_s < 10^5$ gilt:

$$c_w \sim 0{,}4$$

Mit $d = 0{,}003$ m $\qquad \varrho = 1{,}23$ kg/m³

$c_w = 0{,}4$ (gewählt) $\qquad g = 9{,}81$ m/s²

$\varrho_s = 2650$ kg/m³ (Zuschlag)

gilt nach (8) für die Sinkgeschwindigkeit $W_s = 14{,}5$ m/s.
Für die Reynold-Zahl nach (9) erhält man hiermit

$$Re_s = \frac{14{,}5 \cdot 0{,}003}{14{,}6} \cdot 10^6 = 2{,}98 \cdot 10^3$$

$$1000 \leq 2{,}98 \cdot 10^3 < 10^5 \longrightarrow \text{Newton Bereich}$$

Die Wahl von $c_w = 0{,}4$ ist also richtig gewesen.

Für die ungestörte Sinkgeschwindigkeit (ohne vermindernden Einfluß der Rohrwand) gilt:

$$W_{so} = \frac{W_s}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \sim W_s$$

mit D = 50 mm (Rohrdurchmesser)

Nun kann der Rohrreibungsbeiwert λ_z^* nach (7) für den Spritzvorgang in der Atmosphäre mit

$c/_v = 0{,}25$
$W_{so} = 14{,}5$ m/s
$D = 0{,}05$ m
$g = 9{,}81$ m/s² ermittelt werden:

$$\lambda_z^* = 0{,}042$$

b) Überschlägige Bestimmung des Geschwindigkeitsverhältnisses $c/_v$ für den Spritzvorgang in Druckluft mit Hilfe des strenggenommen nur für die Atmosphäre gültigen Reibungsbeiwert λ_z^*

Es gilt nach (6) für einen Luftdruck von 4 bar absolut im Spritzdüsenbereich und mit den sonstigen gemachten Angaben unter a) für die Sinkgeschwindigkeit (8):

$$W_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{0{,}003}{0{,}4} \cdot \frac{2650 - 4 \cdot 1{,}23}{4 \cdot 1{,}23} \cdot 9{,}81}$$

$$W_s \sim 7{,}25 \text{ m/s}$$

Für die Reynold-Zahl erhält man nach (9):

$$Re_s = \frac{7{,}25 \cdot 0{,}003}{1/4 \cdot 14{,}6} \cdot 10^6 = 5{,}96 \cdot 10^3 \rightarrow \text{Newton-Be}$$

Mit $\lambda_z^* = 0{,}042$ kann nach (6) das gesuchte Geschwindigkeitsverhältnis $c/_v$ bestimmt werden

$$c/_v = \frac{1}{1 + 7{,}25\sqrt{\frac{0{,}042}{2 \cdot 0{,}05} \cdot 9{,}81}} = 0{,}40$$

Mit $c = 21$ m/s ($c_a = c_d$) kann die Luftgeschwindigkeit bestimmt werden:

$$v = \frac{1}{0{,}4} \cdot 21 \sim 53 \text{ m/s}$$

und die entsprechende Luftmenge ergibt sich nach (5) zu

$$Q = 53 \cdot 1{,}963 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4}{1} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$Q \sim 25 \text{ m}^3/\text{min}$$

Die maximal erforderliche Ansaugluftmenge des Kompressors (der Kompressor steht in der Atmosphäre) für den Spritzvorgang in einem Überdruckraum von 4 bar absolut wurde damit unter Berücksichtigung der Ausgangsbedingungen und vereinfachten Annahmen für eine Rotor-Trockenspritzmaschine zu 25 m³/min bestimmt.

2.1.3 Ausgewählte Konstruktion der Druckluftkammer

Um die Überdruckversuche durchzuführen, wurde die im Bild 2.1/2 skizzierte ca. 8 m³ große Druckluftkammer entwickelt und gebaut. Sie besteht aus zwei Druckräumen und besitzt ein ca. 1 m x 1 m großes Prüffeld, das in vier gleich große Felder á 50 cm x 50 cm aufgeteilt wird. In der Tür ist gelenkig eine Düsenführung - bestehend aus Kugelhahn, Stahlrohr und Düse - eingebaut, deren Drehpunkt in Bezug auf das Prüffeld etwas tiefer angeordnet ist, um bei geneigter Düse (nach unten) am Prüffeld vorbeispritzen zu können. Der Düsenführer bedient die Spritzdüse auch bei den Überdruckversuchen von der freien Atmosphäre aus. Der Abstand Spritzdüse zur Auftragungsfläche (Prüffeld) beträgt maximal ca. 1,50 m (für die äußerste Prüffeldecke bei einer Spritzbetonschichtstärke von Null) und minimal ca. 1,20 m (bei einer Schichtstärke von 20 cm).
Hinter dem Prüffeld befindet sich ein zweiter kleinerer Druckraum mit entsprechenden Regel- und Meßeinrichtungen zur Simulierung unterschiedlicher Luftdurchlässigkeiten des Spritzuntergrundes, zur Erzeugung von Druckdifferenzen am gespritzten Probekörper und zum Benetzen der rückwärtigen Probekörperoberflächen mit Wasser. Unterschiedliche Luftdurchlässigkeiten werden bei Versuchsbeginn nicht durch verschieden durchlässige Materialien des Haftgrundes (Gebirge) sondern durch die Öffnung bzw. Drosselung eines Handventils vorgenommen, so daß die Luft vom ersten Druckraum (s. Bild 2.1/2) über das luftdurchlässige Prüffeld (Heraklith-Platten) in den zweiten Druckraum und von dort über einen Luftmengenmesser in die freie Atmosphäre gelangen kann. Die Luftdurchlässigkeiten können bis maximal 20 m³/min + m² bei atmosphärischem Luftdruck eingestellt und an einem Luftmengenmesser abgelesen werden. Druckdifferenzen zwischen dem ersten und zweiten Druckraum stellen sich erst ein, wenn das Prüffeld einigermaßen mit Spritzbeton dichtgespritzt worden ist. Der Spritzbeton wird dann durch den jeweils herrschenden Überdruck im ersten Druckraum belastet. Wird der eingestellte Differenzdruck erreicht, so schließt ein Regelventil und

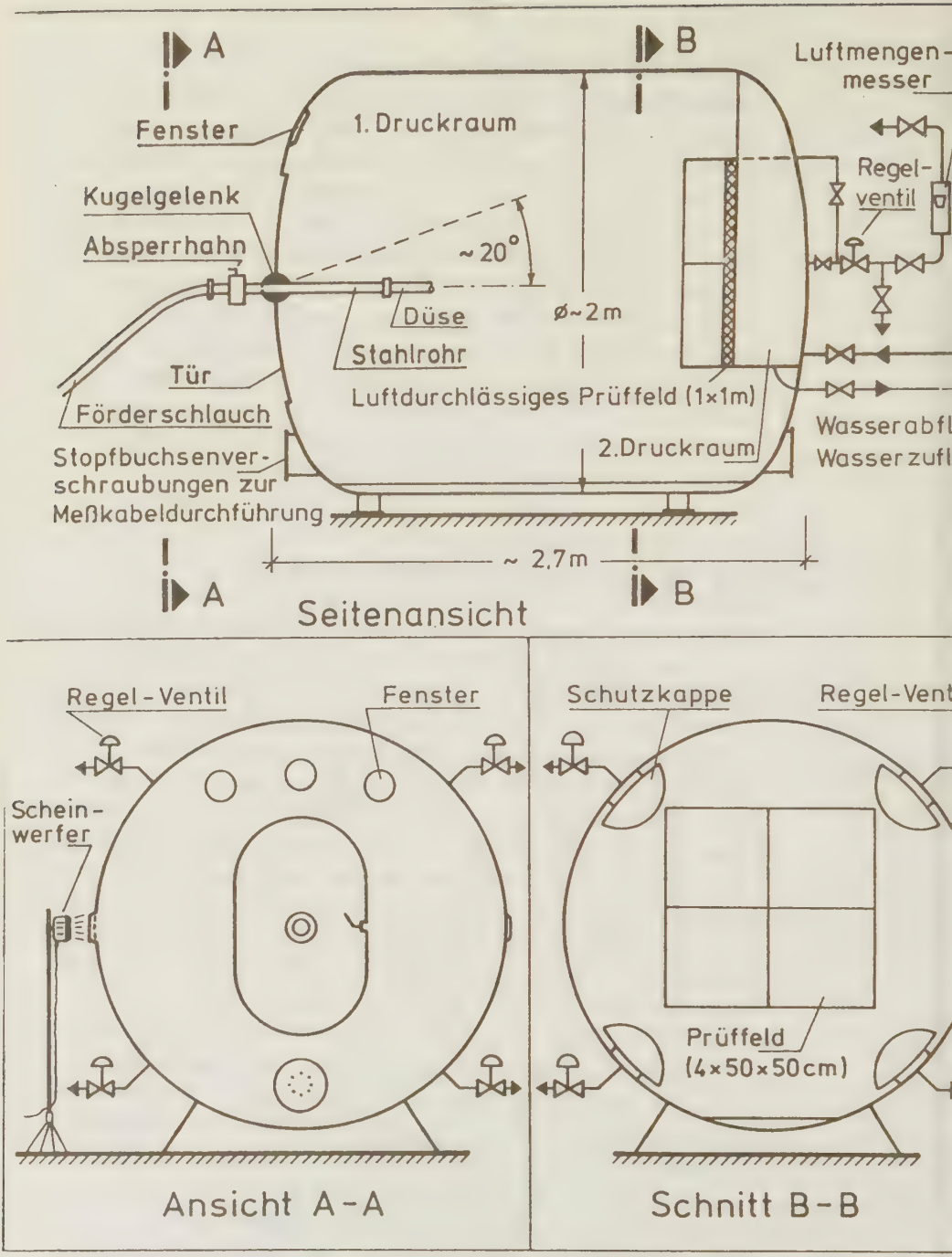


Bild 2.1/2: Druckluftkammer für Spritzbetonversuche (schematische Darstellung)

öffnet erst, wenn durch überströmende Luft der Druck im zweiten Druckraum wieder ansteigt usw. Die Differenzdrücke zwischen den beiden Druckräumen können von 0 bar bis 1 bar an einem Differenzdruckregler vorgewählt werden. Die Differenzdruckregelung ist für die Medien Luft und Wasser ausgelegt worden.
In den zweiten Druckraum kann Wasser geführt werden, das den jungen Spritzbeton von hinten benetzen soll. In Höhe der Prüffeldoberkante ist ein Überlauf angeordnet worden (s. Bild 2.1/2), um zu kontrollieren, daß hinter dem gesamten Prüffeld Wasser ansteht.

Der jeweilige Kammerdruck kann zwischen 0 bar und 3 bar Überdruck beliebig eingestellt werden und wird während des Spritzvorganges über vier Regelventile konstant gehalten. Diese Ventile werden in der Druckkammer durch Siebe und Kappen (s. Bild 2.1/2) vor Verschmutzungen (Rückprall) geschützt.

Eine ausreichende Anzahl von Fenstern erlaubt es, den Spritzvorgang gut von außen zu beleuchten und zu beobachten. Mehrere Stopfbuchsenverschraubungen verschiedener Größe in beiden Druckkammerstirnseiten gestatten z.B. Kabelführungen in den Überdruckbereich.

In der Atmosphäre ist ein gleich großes Prüffeld aufgebaut (1 m x 1 m, in vier gleiche Felder á 50 cm x 50 cm unterteilt), und die Spritzdüse im gleichen Abstand und gleicher Lage, wie beim Überdruckprüfstand, angeordnet worden. Dazu ist das gleiche Kugelgelenk mit Stahlrohr und Düse, wie es auch in die Druckkammer eingebaut worden ist, auf einem am Fußboden angedübelten Bock befestigt worden (Bild 2.1/3). Damit sind die Forderungen nach gleicher Geometrie und Spritztechnik für beide Versuchsstände erfüllt.

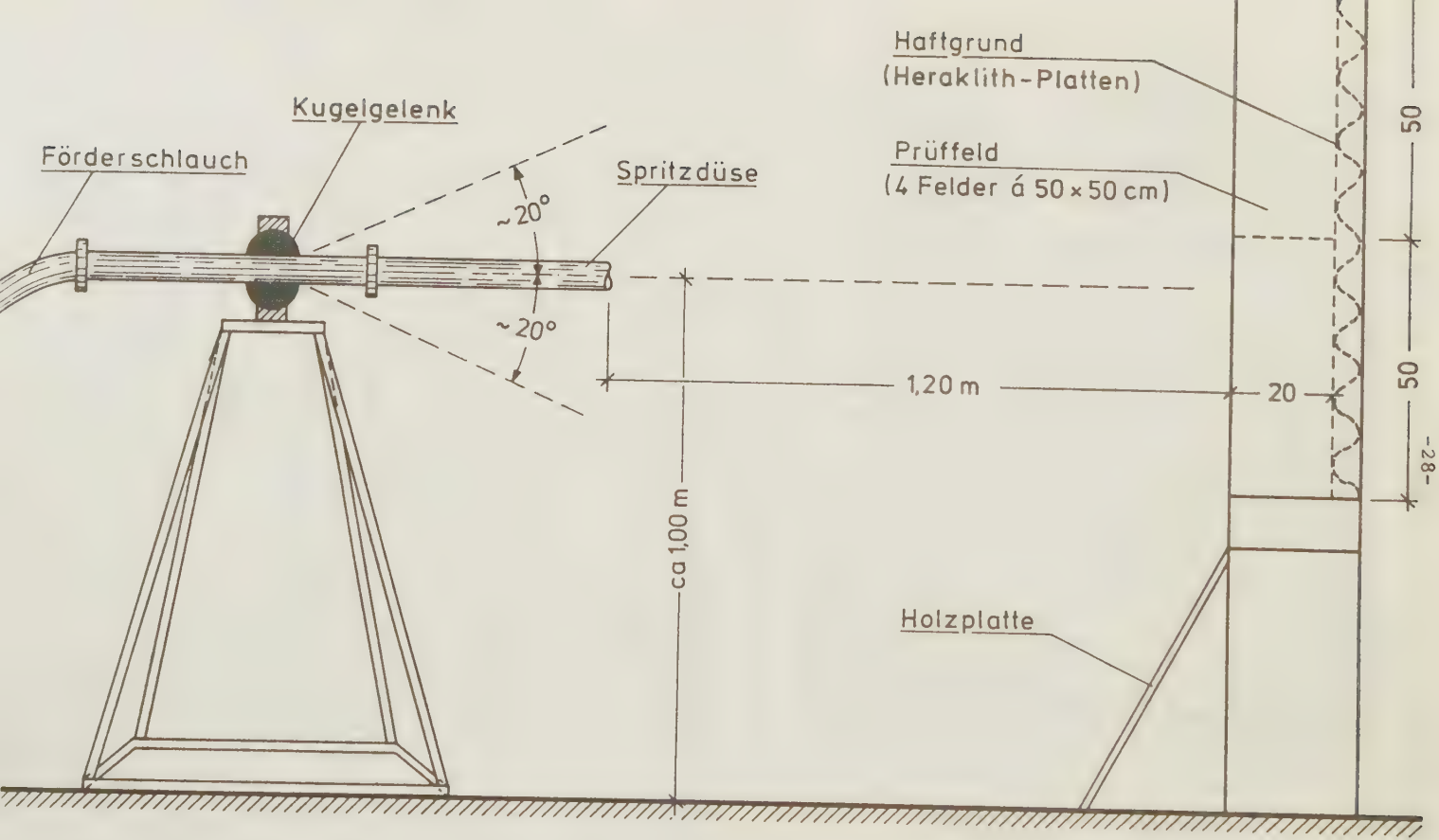


Bild 2.1/3: Atmosphären-Versuchsstand für Spritzbetonversuche (schematische Darstellung)

2.2 Spritzbetonausgangsmischung

Die Spritzbetonmischung bestand aus folgenden Ausgangsstoffen:

(1) Zement

Es wurde ein Portlandzement Anneliese (Ennigerloh, Werk I) PZ 35 F eingesetzt. Die Zugabemenge betrug einheitlich für alle Versuche 340 kg/m³ Ausgangsmischung. Der durchgeführte Erstarrungsversuch ergab den Erstarrungsbeginn nach 2 Stunden und 24 Minuten und das Erstarrungsende nach 3 Stunden und 33 Minuten.

(2) Zuschlag

Bei dem verwendeten Zuschlag handelte es sich um Rheinsand bzw. Rheinkies, der von einer Kiesgrube aus Dormagen angeliefert wurde. Die verwendete Gemengesieblinie ist in Bild 2.2/1 dargestellt und wurde aus drei Einzelkörnungen zusammengesetzt.

(3) Wasser (s. auch Kapitel 2.6)

Die Wasserzugabemenge wurde stets unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung (durch Darrung ermittelt) bestimmt.

Da die Angaben in der Literatur bezüglich der erforderlichen Wasserzugabemenge stark schwanken, ist die bei den Spritzbetonversuchen eingestellte Wasserzugabemenge in Abhängigkeit der Eigenfeuchte in Bild 2.2/2 angegeben. Das Zugabewasser wurde ca. 4,50 m vor der Austrittsöffnung der Spritzdüse (Vorbenetzungseinrichtung) in den Förderschlauch über acht Düsen eingespritzt (Ausnahme bei den Staubversuchen siehe Kapitel 3).

Die jeweils erforderliche Wassermenge bei den Atmosphären- und Überdruckversuchen wurde gemäß Bild 2.2/3 zugegeben.

(4) Betonzusatzmittel

Bei den Druckfestigkeitsversuchen wurden folgende BE-Mittel verwendet:

- Pulverförmiges BE-Mittel
  Addiment der Firma Portlandzementwerke Heidelberg AG, Leimen. Zugegeben wurden 4 % des Zementgewichtes der Ausgangsmischung direkt in den Mischer.

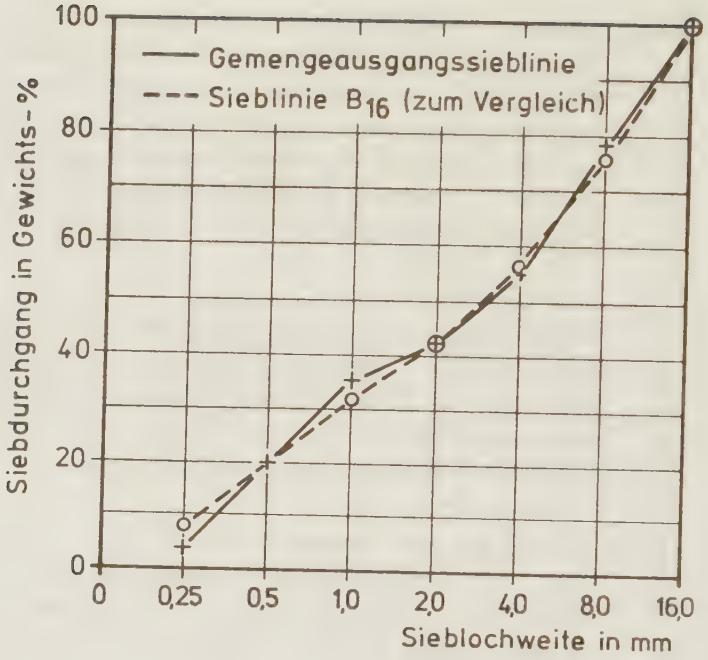


Bild 2.2/1: Gegenüberstellung der für die Versuche zusammengestellten Gemengesieblinie und der Sieblinie B_{16}

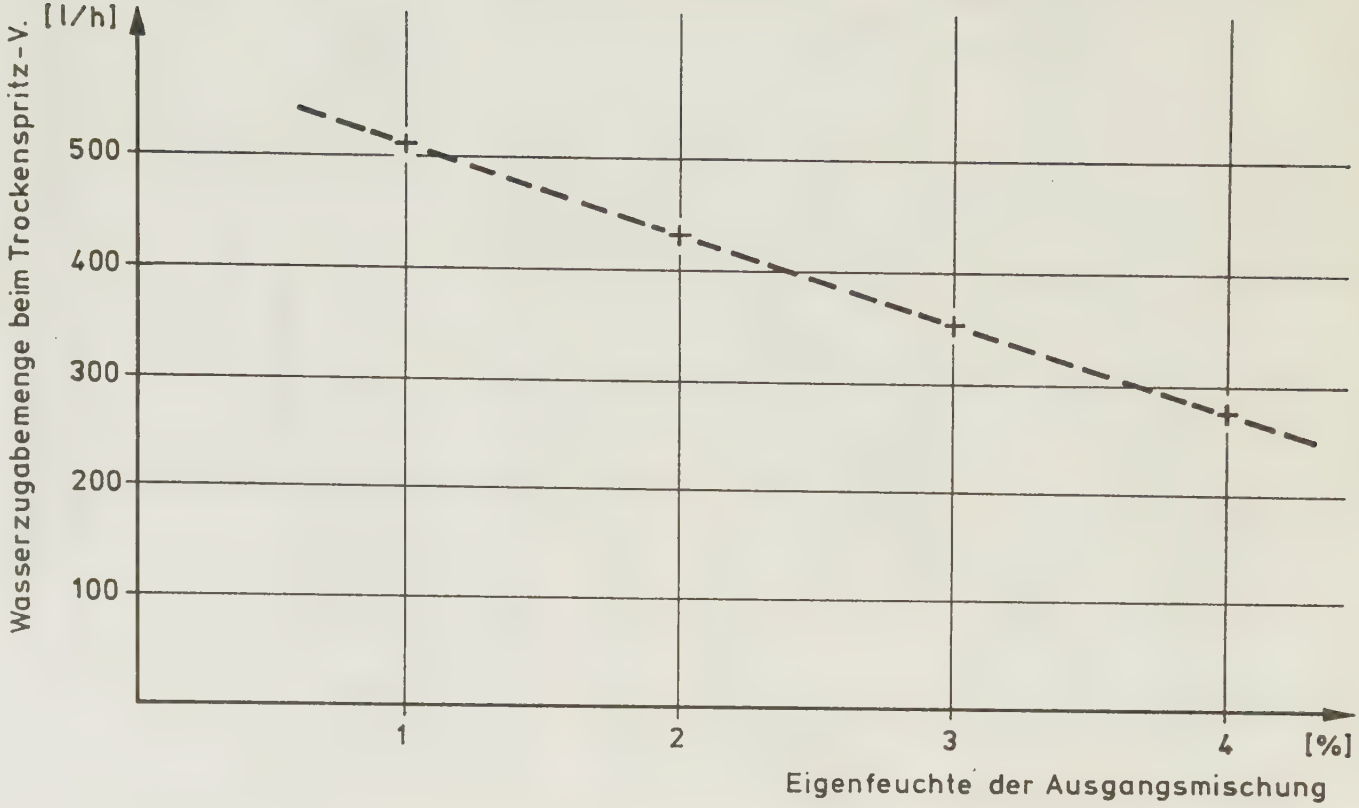


Bild 2.2/2: Wasserzugabemenge in Abhängigkeit der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung bei einer Leistung der Spritzbetonmaschine von ca. 4 m³/h.

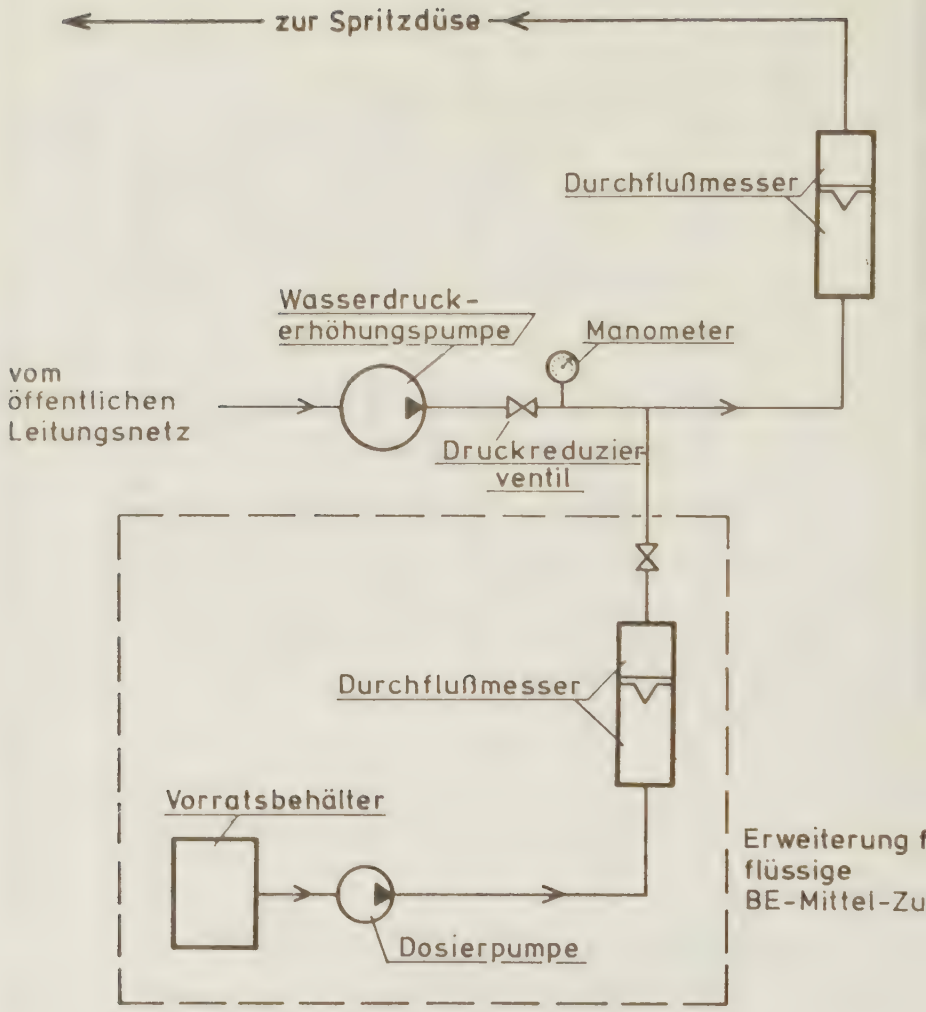


Bild 2.2/3: Wasserstation mit Zusatzeinrichtung für die flüssige BE-Mittel-Zugabe (schematische Darstellung)

- Flüssiges BE-Mittel
  Barra Gunit F 80 der Firma Meynadier, Zürich
  Die Dosierungsmenge betrug ca. 3 % des Zementgewichtes der Ausgangsmischung (nach Eignungsprüfung). Die Zugabe des flüssigen BE-Mittels erfolgte über die Zusatzeinrichtungen gemäß Bild 2.2/3.
  Das BE-Mittel muß unbedingt erst hinter der Wasserdruckerhöhungspumpe in den Wasserstrom gegeben werden, um sicherzustellen, daß kein BE-Mittel durch die Dosierpumpe zurück ins öffentliche Trinkwasserversorgungsnetz gedrückt wird.

Bei den Staubversuchen (siehe Kapitel 3) wurden zusätzlich noch folgende weitere BE-Mittel verwendet:

- Fluresit schnell der Firma Unitecta, Esslingen
- MC-Spritzhilfe der Firma MC-Bauchemie, Essen
- Tricosal der Firma Chem. Fabrik Grünau GmbH, Illertissen/Bayern
- Guttacret der Firma Gutta GmbH, Offenburg/Baden
- VP8030 flüssig der Firma Meynadier, Zürich

Um die vorhandene Druckfestigkeit zu ermitteln, mußten die Spritzbetonplatten mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm x ca. 20 cm bzw. ca. 10 cm aus den Prüffeldern ausgebaut, mit der Kernnaßbohrmaschine Kerne mit einem Durchmesser von 10 cm gebohrt und an der Naß-Schnittmaschine auf die erforderliche Höhe von 10 cm geschnitten werden. Die Lagerung der Bohrkerne bis zur Prüfung erfolgte nach DIN 1048, Teil 1, unter Wasser und bei einer Lufttemperatur von ca. 20° C. Die Bohrkerne für die Druckfestigkeitsprüfung wurden mit Schwefelzement abgeglichen und je nach Anforderung nach 28 h, 7 d oder 28 d in der Prüfpresse abgedrückt.

2.3 Ermittlung der Festigkeitsstreuungen innerhalb des Prüffeldes

Mit Hilfe dieser Versuche sollte geklärt werden, ob die Streuungen der 28 h-Druckfestigkeiten innerhalb des in vier gleiche Felder à 50 cm x 50 cm unterteilten Prüffeldes so gering sind, daß die weiteren Versuche mit diesem unterteilten Prüffeld durchgeführt werden können.

Es wurden hierzu 5 Versuche durchgeführt und je Versuch 12 Bohrkerne entsprechend Bild 2.3/1 entnommen.

Die Standardabweichung der untersuchten Proben betrug maximal in einem Versuch 2,95 N/mm² und i. M. ca. 1,95 N/mm². Bei diesen für Spritzbeton geringen Streuungen in den ermittelten Druckfestigkeiten kann das in vier gleiche Felder à 50 cm x 50 cm unterteilte Prüffeld als eine Einheit angesehen werden. Voraussetzung ist jedoch, daß nur Bohrkerne aus den Prüffeldern entnommen werden, die mindestens 10 cm vom jeweiligen Probekörperrand entfernt liegen. Die Unterteilung des ca. 1 m x 1 m großen Prüffeldes ergibt einen erheblichen Vorteil für den Ausbau der Probeplatten (Gewicht).

In den nachfolgenden Druckfestigkeitsversuchen (s. Kapitel 2.7) ergab sich eine Standardabweichung i. M. von etwa 2 N/mm²

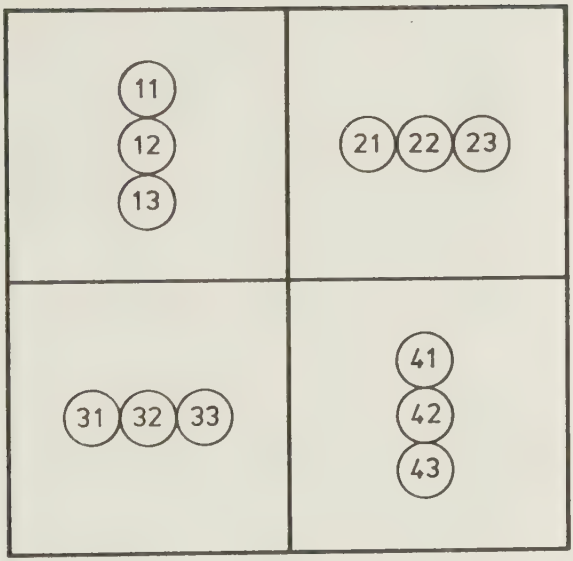


Bild 2.3/1: Bohrkern-Nummern und zugehörige Lage im Prüffeld

2.4 Experimentelle Bestimmung des erforderlichen Förderdrucks und Messung des zugehörigen Luftmengenverbrauchs für die Spritzbetonförderung

2.4.1 Ermittlung des erforderlichen Förderdruckes

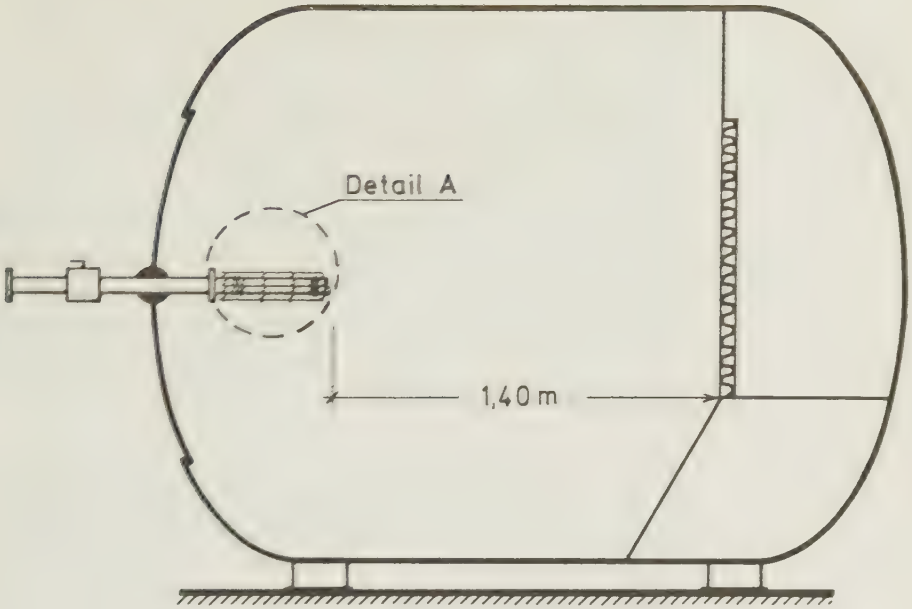
Um vergleichbare Ausgangsbedingungen bei den Spritzbetonversuchen in der Atmosphäre und im Überdruckbereich zu schaffen, ist u.a. auch dafür Sorge zu tragen, daß bei beiden Versuchen der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine so eingestellt wird, daß die Normal- und Überdruckspritzbetonproben gleichwertig verdichtet werden. Dies hat bei den hier durchgeführten Versuchen insofern eine große Bedeutung, da die Spritzbetonmaschine auch bei den Überdruckversuchen in der Atmosphäre und nicht im Druckbereich steht. Der Druck an der Spritzbetonmaschine wurde bei allen Versuchen direkt am Ablaßstutzen (Stelle, an der die Ausgangsmischung von der Spritzbetonmaschine in den Förderschlauch übergeben wird) mit einem Manometer gemessen. Es ist zu erwarten, daß der eingestellte Förderdruck für die Spritzbetonversuche in der Atmosphäre um den jeweiligen Kammerüberdruck erhöht werden muß, um einen gleichwertig verdichteten Spritzbeton unter Überdruck herstellen zu können. Die Richtigkeit dieser Behauptung sollte durch folgende drei Versuchsreihen überprüft werden.

- Bestimmung der Materialgeschwindigkeit im Düsenbereich
- Ermittlung des Spritzbetonaufpralls an der Auftragungsfläche (vgl. Kapitel 2.1.2)
- Betontechnologische Analysen

Die hier beschriebenen Versuche wurden mit einer Rotor-Trockenspritzbetonmaschine (Aliva 260) durchgeführt.

(1) Bestimmung der Materialgeschwindigkeit im Düsenbereich

In Anlehnung an den Versuchsaufbau von Hehn [5] und die durchgeführten Versuche von Gasterstädt [18] und Lutsch [6] wurde die Materialgeschwindigkeit des Spritzbetons mit Hilfe von Stahlkugeln, die zwei Induktionsspulen passieren (siehe Bild 2.4/1), gemessen.



Detail A

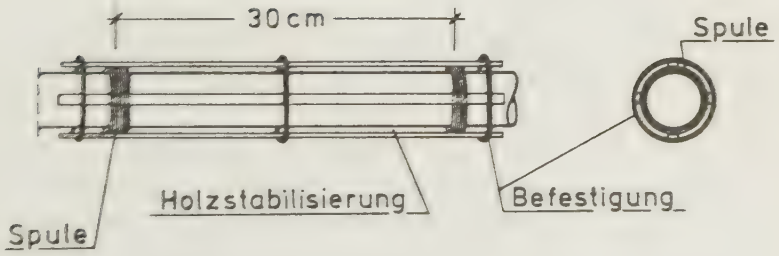


Bild 2.4/1: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Materialgeschwindigkeiten des Spritzbetons mit Hilfe von Stahlkugeln

Nach Lutsch [6] verhalten sich die Stahlkugeln wie die gehörigen gewichtsgleichen Kieskörner (ϱ_{Stahl} = 7,85 t/m³; ϱ_{Kies} = 2,65 t/m³; s. Kapitel 2.1.2). Es wurden Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 7 mm und 10 mm, dies entspricht Kieskörnern mit einem Durchmesser von 10 mm und 15 mm, verwendet. Eine Stahlkugel bewirkt beim Passieren der ersten und zweiten Induktionsspule je einen Ausschlag am angeschlossenen Linienschreiber. Der Linienschreiber wurde auf einen konstanten Papiervorschub von 1250 mm pro Sekunde eingestellt, so daß mit Hilfe des Abstandes der markierten Ausschläge auf dem Papier die Zeit bestimmt werden kann, die die Kugel für den Weg von der ersten zur zweiten Induktionsspule benötigt.

Ziel war es, festzustellen, ob die Materialgeschwindigkeit der Stahlkugeln bei vergleichsweise gleichem Förderdruck bei den Atmosphären- und Überdruckversuchen im Spritzdüsenbereich unverändert bleibt. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Geschwindigkeit der Stahlkugeln, die im Spritzgut eingebettet durch den Förderschlauch transportiert werden, der Geschwindigkeit der Betonmischung annähernd entspricht. Außerdem sollten die Versuche Aufschluß über die hier vorliegenden Materialgeschwindigkeiten geben, um auch z.B. den Rohrreibungsbeiwert λ_z^* bestimmen zu können (s. Kapitel 2.4.2).

Die Versuchsergebnisse können direkt Bild 2.4/2 entnommen werden. Dabei erscheint folgendes bemerkenswert:

- Wenn bei den Überdruckversuchen der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine so eingestellt wird, daß der jeweilige Kammerinnendruck zu dem gewählten Förderdruck in der Atmosphäre hinzuaddiert wird, so ergeben sich stets gleiche Materialgeschwindigkeiten.

- Ein nennenswerter Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 7 mm und 10 mm bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen konnte

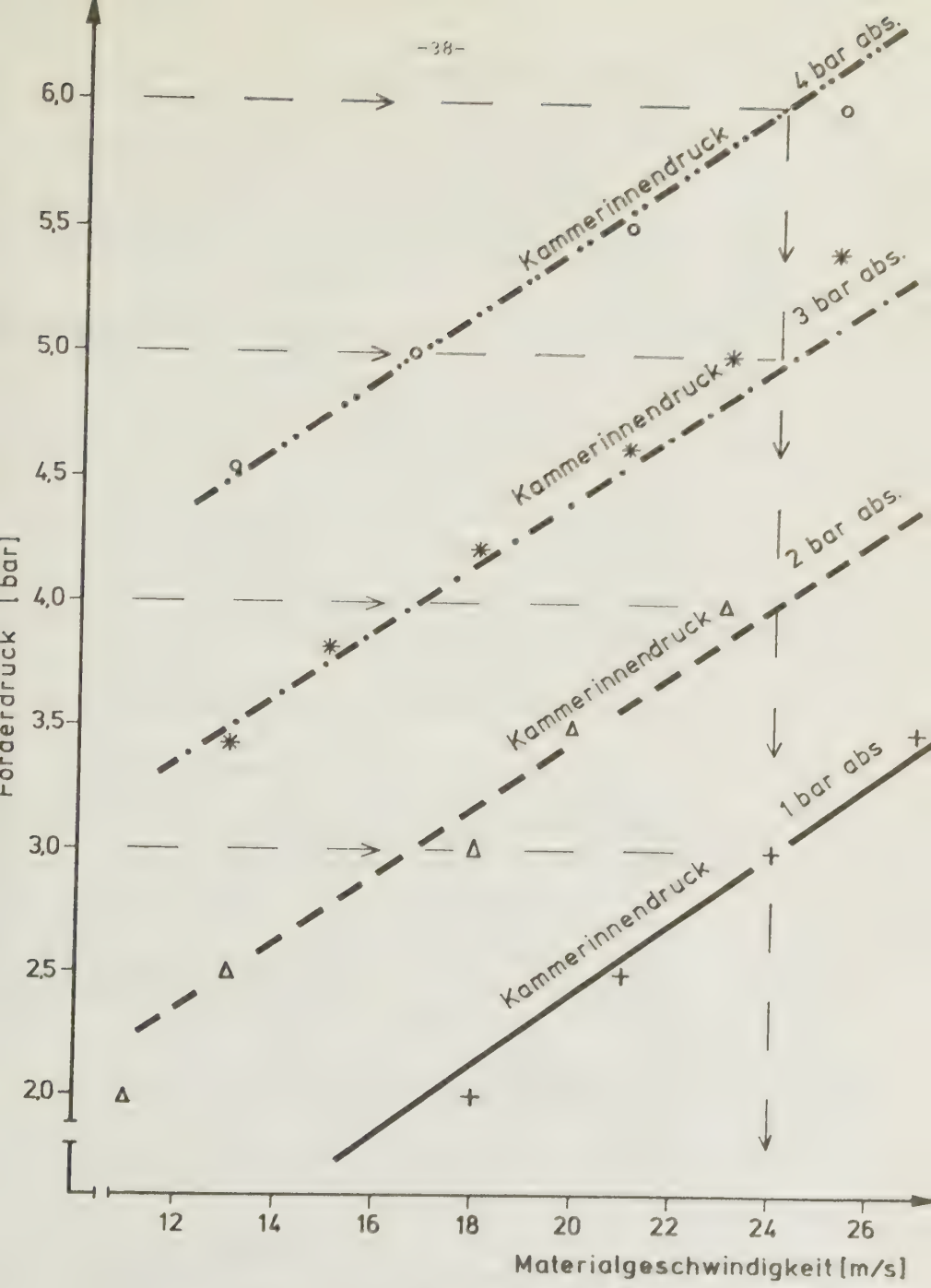


Bild 2.4/2: Materialgeschwindigkeit im Spritzdüsenbereich in Abhängigkeit vom Förderdruck an der Spritzbetonmaschine und des Kammerüberdruckes

nicht festgestellt werden.

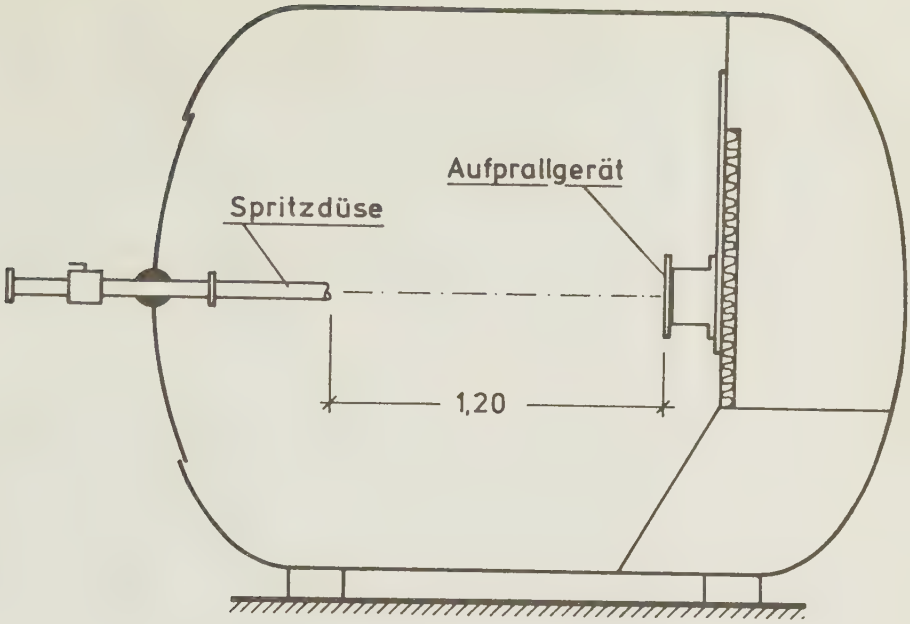
- Die günstige Materialgeschwindigkeit des Spritzbetons liegt im Bereich zwischen ca. 21 m/s und 27 m/s. Eine geringere bzw. größere Materialgeschwindigkeit hat Verstopfer bzw. erhöhten Rückprall zur Folge.

(2) Ermittlung des Spritzbetonaufpralls an der Auftragungsfläche

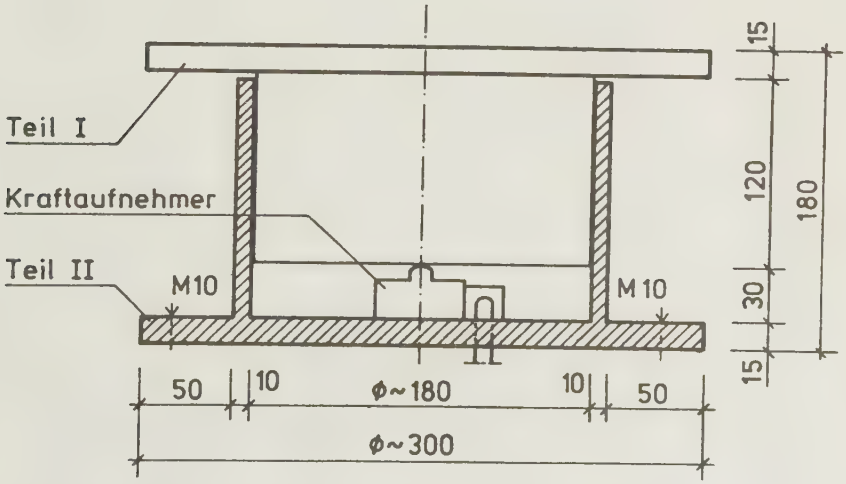
Mit Hilfe der Materialgeschwindigkeitsmessungen im Spritzdüsenbereich kann nicht der Einfluß der Geschwindigkeitsminderung auf der Flugbahn von der Düse zur Auftragungsfläche erfaßt werden. In Kapitel 2.1.2 wurde theoretisch dieser Geschwindigkeitsabfall als vernachlässigbar angesehen. Die Versuche zur Ermittlung des Spritzbetonaufpralls an der Auftragungsfläche sollten hier Gewißheit verschaffen. In erster Linie wird bei den hier vorliegenden Materialgeschwindigkeiten der Aufprall der Feststoffteilchen mit großem Korndurchmesser erfaßt (s. Kapitel 2.1.2).

Der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine muß bei den Versuchen in der Atmosphäre und in Druckluft so eingestellt werden, daß in beiden Fällen stets ein gleicher Aufprall der Spritzbetonmischung am Prüffeld gewährleistet wird. Dabei kommt es in erster Linie nicht auf sehr große Genauigkeit an (der Förderstrom schwankt auch in gewissen Grenzen) sondern darauf, daß exakte Vergleichsmessungen in der Atmosphäre und in Druckluft mit der gleichen Meßeinrichtung möglich sind.

Der Versuchsaufbau ist Bild 2.4/3 zu entnehmen. Die Spritzdüse wurde stets horizontal so ausgerichtet, daß die Düsenachse mittig auf das Aufprallgerät auftrifft. Das Aufprallgerät besteht aus zwei Teilen. Teil I ist eine ca. 10 mm dicke Stahlplatte mit einem Durchmesser von ca. 300 mm. Gegen diese Platte wird das Spritzbetongemisch gespritzt. Die Platte wird über einen mit Bohrungen (Gewichtsersparnis) versehenen



a) Versuchsaufbau in der Druckkammer



b) Aufprallgerät

Bild 2.4/3: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Spritzbeton-aufpralls an der Auftragungsfläche und zugehöriges Aufprallgerät

Rundzapfen in einem Rohrstück mit Endplatte (Teil II) geführt. Der Rundzapfen und das Rohrstück sind auf Passung gearbeitet. Mittig auf der Endplatte ist ein Kraftaufnehmer befestigt. Die Endplatte hat eine Bohrung, die als Durchführung für das Kabel des Kraftaufnehmers und zum Druckausgleich dient. Mit dem eingesetzten Kraftaufnehmer (0 - 1000 N; Genauigkeitsklasse 0,2) ist eine nahezu weglose Messung möglich.

Die Versuchsergebnisse sind in Bild 2.4/4 dargestellt. Zusätzlich sind in diesem Bild drei Bereiche eingetragen, die sich anhand der durchgeführten Versuche für die hier vorliegenden Versuchsbedingungen ergeben haben. Danach war es empfehlenswert, den Förderdruck an der Spritzbetonmaschine so einzustellen, daß sich eine Aufprallkraft von ca. 50 - 60 N (Bereich 2) ergab. Dies bedeutete z.B. für die Versuche in der Atmosphäre einen Förderdruck zwischen ca. 2,6 bar und 3,4 bar. Wenn der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine so eingestellt wurde, daß die Aufprallkraft größer als 60 N (Bereich 3) bzw. kleiner als 50 N (Bereich 1) war, so mußte mit einem stark anwachsenden Rückprall bzw. mit Verstopfern gerechnet werden. Bei günstigen Bedingungen konnte bei einem Förderdruck, der eine Aufprallkraft von ca. 45 N erzeugte, gerade noch gespritzt werden (unterste Grenze). Ferner kann Bild 2.4/4 der erforderliche Förderdruck an der Spritzbetonmaschine bei den Überdruckversuchen entnommen werden. Dieser ergibt sich aus der Addition des in der Atmosphäre gewählten Förderdruckes und dem jeweiligen Kammerinnendruck, da nur so gleiche Aufprallkräfte für die Atmosphären- und Überdruckversuche erreicht werden. Das Ergebnis bestätigt somit die bereits getroffenen Feststellungen.

(3) Betontechnologische Analysen

Bei sonst konstanten Ausgangsbedingungen (konstante Mischung, unveränderte Wasserzugabe usw.) war es Ziel der Analysen festzustellen, ob sich die Spritzbetonzusammensetzung am Prüffeld ändert, erstens durch die

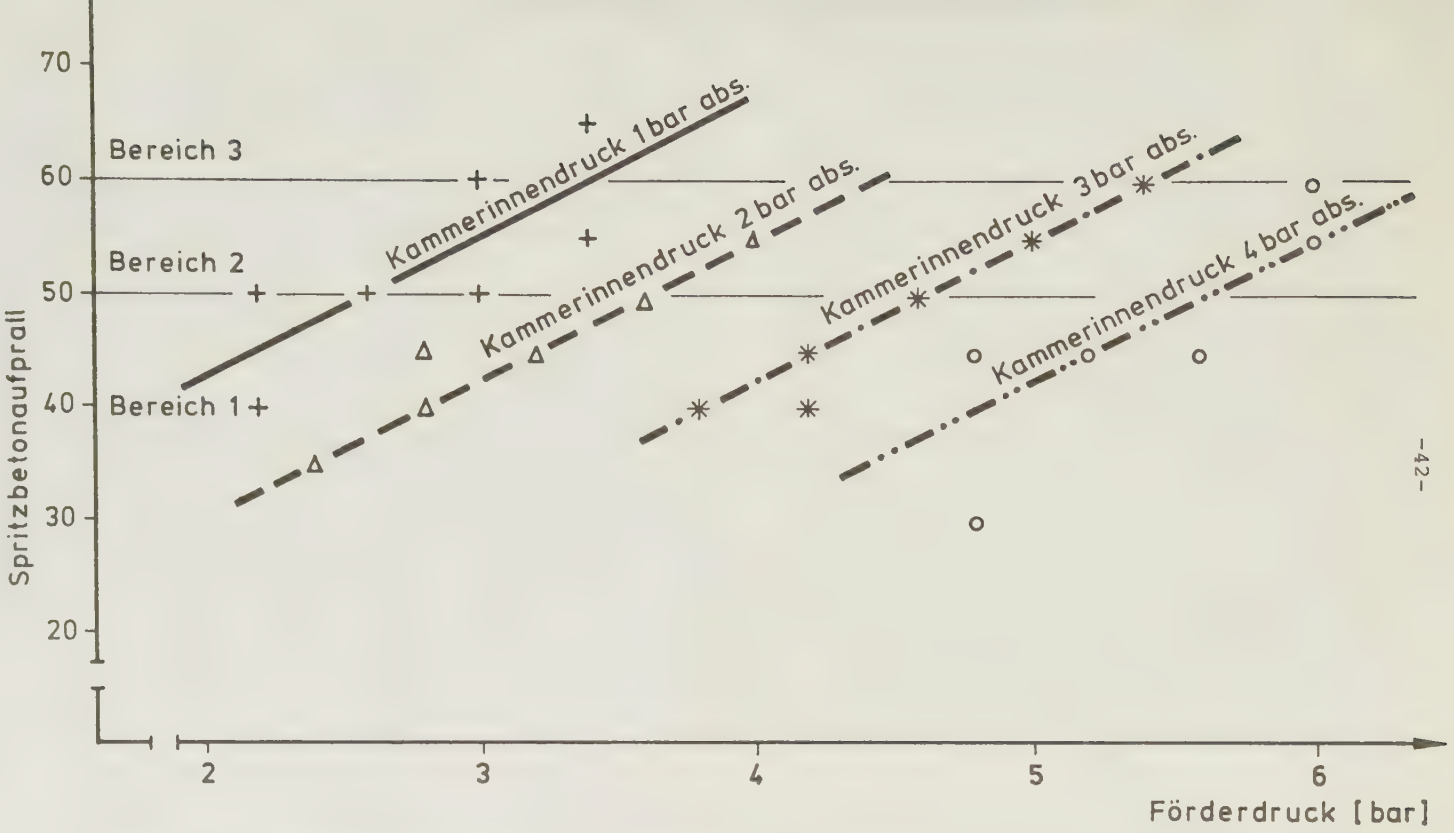


Bild 2.4/4: Spritzbetonaufprall in Abhängigkeit vom Förderdruck an der Spritzbetonmaschine (Bereich 1: Verstopfergefahr; Bereich 2: günstig; Bereich 3: großer Rückprall)

Variation des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine und zweitens bei sich entsprechenden Förderdrücken bei den Atmosphären- und Überdruckversuchen. Hauptaugenmerk galt hier besonders den Feinstanteilen (z.B. Zement), da mit Hilfe der Materialgeschwindigkeit- und Aufprallmessungen ihr Flugverhalten nicht erfaßt werden konnte. Die Spritzbetonzusammensetzung wurde durch Betonanalysen bestimmt. Hierbei wurden Proben für die Bestimmung des Wassergehaltes (durch Darren) und der Spritzbetonzusammensetzung (Auswaschversuch) am Prüffeld entnommen. Da beim Auswaschversuch außer dem Zement auch Feinstsandanteile mit ausgewaschen werden, wurde der Zementgehalt unter Berücksichtigung der Körnung 0,2/0,25 mm der Probe und der Körnung 0/0,2 mm und 0,2/0,25 mm der Vergleichssieblinie bestimm
Die Versuchsergebnisse sind den Bildern 2.4/5, 2.4/6 und 2.4/7 zu entnehmen, wobei besonders folgende Punkte bei den hier vorliegenden Ausgangsbedingungen beachtenswert sind:

- Mit steigendem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine wächst auch im untersuchten Bereich der Zementgehalt am Prüffeld. Eine Erhöhung des Förderdruckes bei Versuchen in der Atmosphäre von z.B. 2 bar auf 3,5 bar läßt den Zementgehalt am Prüffeld um fast 50 % von 340 kg/m³ auf 500 kg/m³ anwachsen (s. Bild 2.4/5). Dieses Ergebnis wird von Lutsch [6] bestätigt, der bei eigenen Versuchen durch die Erhöhung des Förderdruckes von 2 bar auf 4 bar (Düsenabstand zur Auftragungsfläche 1 m) eine Erhöhung des Zementgehaltes am aufgetragenen Spritzbeton um ca. 60 % von etwa 280 kg/m³ auf ca. 450 kg/m³ feststellte.
- Bei einem gewählten Förderdruck von 3 bar an der Spritzbetonmaschine (bei den Atmosphärenversuchen) nimmt der Zementgehalt in der aufgetragenen Spritzbetonmischung im Vergleich zur Ausgangsmischung i.M. um ca. 35 % zu.

  Dies ist ein in der Praxis üblicher Wert [3], [4]. Bedingt durch den Rückprall ist der Zementgehalt im aufgetragenen Spritzbeton stets größer als in der

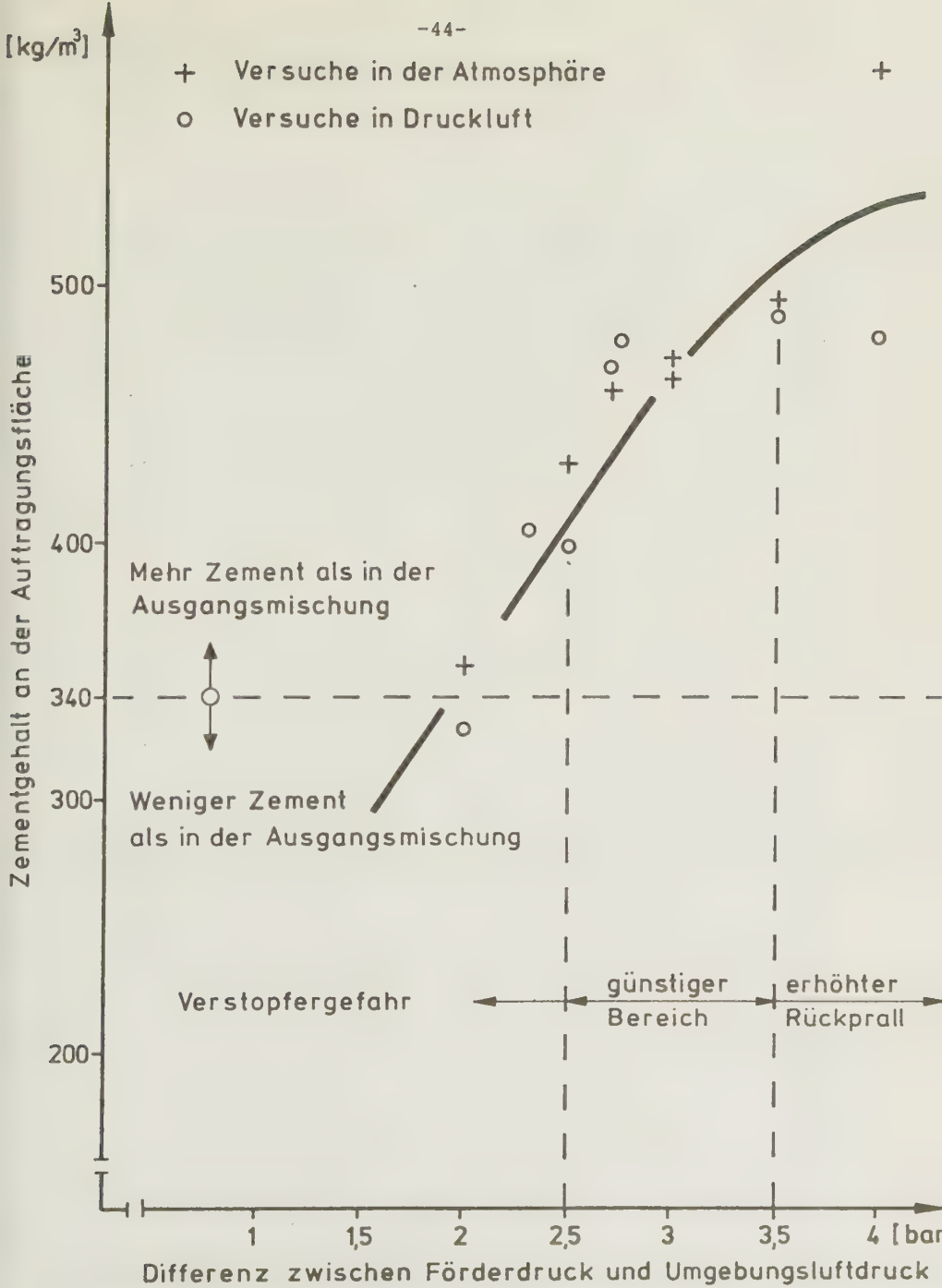


Bild 2.4/5: Zementgehalt an der Auftragungsfläche in Abhängigkeit vom Förderüberdruck an der Spritzbetonmaschine

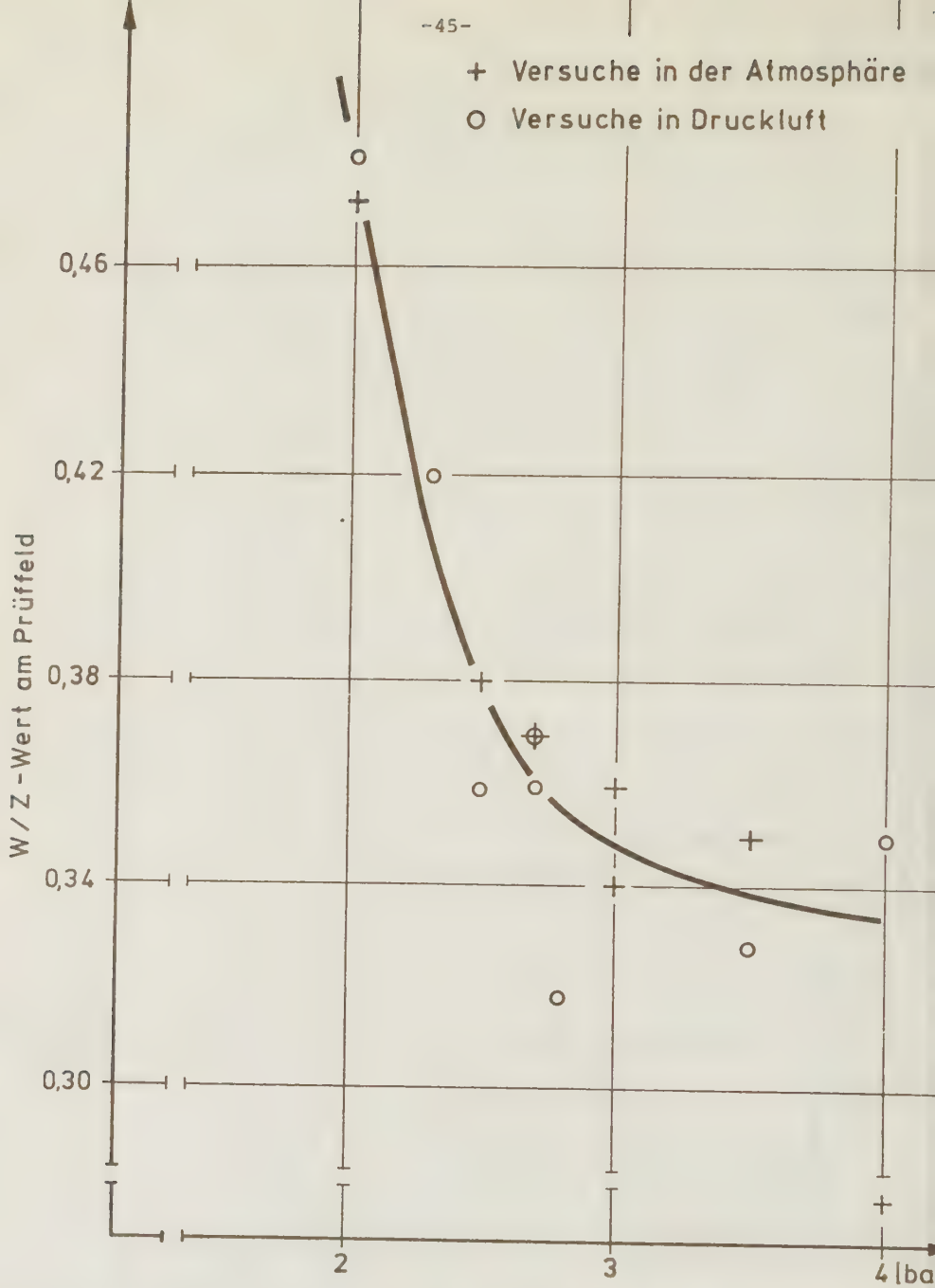


Bild 2.4/6: W/Z-Wert des Betons an der Auftragungsfläche in Abhängigkeit vom Förderüberdruck an der Spritzbetonmaschine

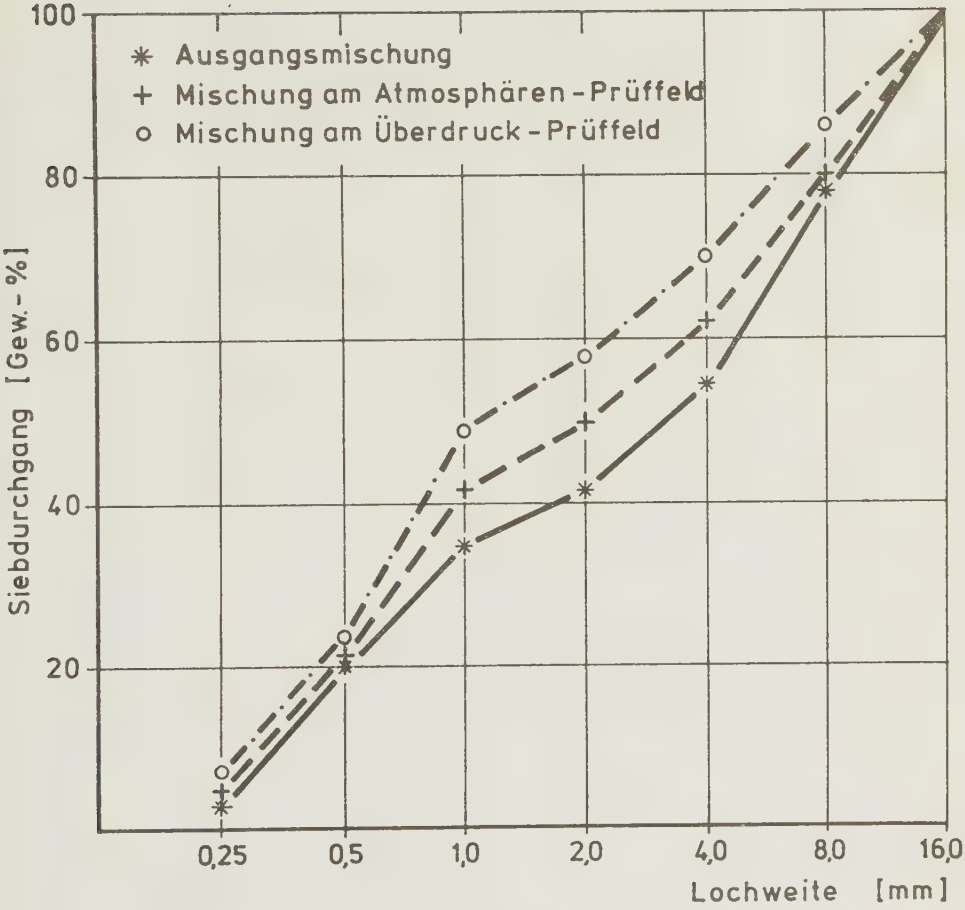


Bild 2.4/7: Gemittelte Sieblinien der Betonanalysen (Auswaschversuche)

Ausgangsmischung und erhöht sich nach Linder [29] um etwa ein Drittel (Größenordnung).

- Wenn bei den Überdruckversuchen der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine so eingestellt wird, daß der jeweilige Kammerinnendruck zu dem gewählten Förderdruck in der Atmosphäre hinzuaddiert wird, so ergibt sich bei den Atmosphären- und Überdruckversuchen etwa der gleiche Zementgehalt am Prüffeld (Bild 2.4/5).
- Durch die Zunahme des Zementgehaltes am Prüffeld mit steigendem Förderdruck und unverändertem Wassergehalt in der Betonprobe (Die Wasserzugabemenge wurde konstant gehalten.) nimmt entsprechend Bild 2.4/6 der W/Z-Wert ab. Bei einem Förderdruck von 3 bar an der Spritzbetonmaschine ergibt sich im aufgespritzten Beton i. M. ein W/Z-Wert von nur ca. 0,35. Die Zementzugabe in der Ausgangsmischung hätte entsprechend reduziert werden können, um den W/Z-Wert auf z. B. 0,4 zu erhöhen. Jedoch standen folgende Gesichtspunkte dagegen:

  . In der Praxis sind Zementgehalte in der Spritzbetonausgangsmischung von ca. 380 kg/m³ keine Seltenheit [3], [7]. Ruffert [8] gibt einen unteren Mindestzementgehalt von ca. 350 kg/m³ an. Eine weitere Verminderung des Zementgehaltes von 340 kg/m³ in der Ausgangsmischung ist also nicht praxisgerecht.

  . Ein W/Z-Wert von 0,35 ist nach Spang [4] beim Betonspritzen noch günstig und nach Wollmann [3] auch in der Praxis anzutreffen. Ruffert [8] bestätigt ebenfalls, daß der W/Z-Faktor sehr niedrig liegt, da fast kein Wasser zur Verarbeitung gebraucht wird, sondern nur so viel Wasser, daß das Material kleben bleibt.

  . Die einzelnen Mischungen für die Spritzbetonversuche wurden in einem 250 l Zwangsmischer hergestellt. Auf jede Mischung entfiel bei der jetzigen

Wahl des Zementgehaltes genau ein Sack Zement (50 kg). Eine Verminderung des Zementgehaltes hätte ein aufwendiges Abwiegen mit zusätzlichen Fehlerquellen bedeutet.

. Lutsch [6] hat in Vergleichsuntersuchungen festgestellt, daß die Zementgehalte je nach Prüfmethode unterschiedlich ausfallen. So ergaben sich in der Regel bei der Zementgehaltsbestimmung nach der Frischbetonanalyse höhere Werte als nach einer chemischen Analyse. Dies bedeutet, daß nicht ausgeschlossen wird, daß, bedingt durch das angewandte Prüfverfahren, die Zementgehalte etwa zu groß bzw. die W/Z-Werte etwas zu niedrig ausgefallen sind.

- Die Sieblinien der ausgewaschenen Zuschläge verschieben sich i.M. im Vergleich zur Sieblinie der Ausgangsmischung bei den Atmosphären- bzw. Überdruckversuchen nur geringfügig bzw. etwas stärker zum feineren Bereich hin (Bild 2.4/7). Die stärkere Verschiebung der Sieblinie bei den Druckluftversuchen zum feineren Bereich hin, insbesondere im Korngrößenbereich 1 mm bis 4 mm, ist wahrscheinlich auf die etwas höhere Materialgeschwindigkeit dieser Zuschlagkörner bei den Atmosphären-Versuchen zurückzuführen. Nach Kapitel 2.4.2 beträgt die Luftgeschwindigkeit im Spritzdüsenbereich bei den Atmosphären-Versuchen v ≈ 100 m/s bzw. bei den 3 bar Überdruckversuchen nur v ≈ 50 m/s. Da die kleineren Zuschlagkörner infolge geringerer Massenträgheitskräfte schneller durch die Förderdruckluft beschleunigt werden können, erreichen sie beim Spritzvorgang in der Atmosphäre, bedingt durch die dortige größere Luftgeschwindigkeit auf den letzten Metern im Förderschlauch höhere Geschwindigkeiten als beim Spritzvorgang in Druckluft.
Diese Geschwindigkeit ist nun so groß, daß beim Spritzvorgang in der Atmosphäre geringfügig mehr Kornanteile 1 mm bis 4 mm von der Auftragungsfläche zurückprallen als beim Spritzvorgang in Druckluft.

(4) Zusammenfassung der wesentlichsten Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung des erforderlichen Förderdruckes für die Spritzbetonförderung

Ausgehend von einem gewählten Förderdruck an der Trockenspritzbetonmaschine bei den Atmosphärenversuchen von 3 bar ergeben die durchgeführten Versuche - wie bereits eingangs vermutet - Förderdrücke von 4 bar, 5 bar und 6 bar für die Überdruckversuche bei einem Kammerinnenüberdruck von 1 bar, 2 bar und 3 bar (die Spritzbetonmaschine steht auch bei den Überdruckversuchen in der freien Atmosphäre). Die richtige Wahl der Förderdrücke für die Spritzbetonversuche wird durch folgendes im einzelnen belegt:

- Die Aufprallkraft (s. Bild 2.4/4) ist in diesen Fällen gleich

- Die Materialgeschwindigkeit beträgt für die gewählten Förderdrücke einheitlich ca. 24 m/s (s. Bild 2.4/2)

- Der Zementgehalt am Prüffeld beträgt bei den Atmosphären- und Überdruckversuchen ca. 460 kg/m³ (s. Bild 2.4/5). Dieser Zementgehalt im aufgespritzten Beton ist durchaus üblich. Wollmann [3] gibt Zementgehalte im Fertigbeton von 450 - 500 kg/m³ und Schwanda [9] als obere Grenze sogar 600 kg/m³ an.

Der Kompressor für die Spritzbetonförderung muß damit für die geplanten Versuche für einen Betriebsüberdruck von mindestens 6 bar ausgelegt werden. Bei der praktischen Versuchsdurchführung ist nicht auszuschließen, daß der anfangs genau eingestellte Förderdruck an der Spritzbetonmaschine sich u.U. während des Spritzvorganges doch noch geringfügig verändert. Ob sich dies auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons auswirkt, und in welchen Grenzen der Ist-Förderdruck vom Sollwert abweichen darf, dies wird in weiteren Versuchen (s. Kapitel 2.5) untersucht.

2.4.2 Messung der verbrauchten Luftmenge

Gemessen wurde im Rahmen dieser Versuche die im Mittel erforderliche Ansaugluftmenge des Kompressors in Abhängigkeit des eingestellten Förderdruckes an der Trockenspritzmaschine (s. Bild 2.4/8). Die jeweils kurzfristig erreichten Spitzenverbrauchswerte lagen um ca. 30 % über den in Bild 2.4/8 angegebenen Werten.
Bei einem Kammerüberdruck von 3 bar und einem Förderdruck von 6 bar an der Spritzbetonmaschine wurden z.B. i.M. ca. 19 m^3/min (Spitzenverbrauchswert ca. 26 m^3/min) Ansaugluftmenge benötigt.
Nach Kapitel 2.1.2 wurden grob für die Trockenspritzmaschine maximal etwa 25 m^3/min (ohne Berücksichtigung von Luftverlusten an der Spritzbetonmaschine) Ansaugluftmenge abgeschätzt.
In Tabelle 2.4/1 sind Meßergebnisse und Berechnungen in Abhängigkeit des Kammerdruckes bzw. des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine zur Bestimmung des Geschwindigkeitsverhältnisses $^c/_v$ und des Rohrreibungsbeiwertes λ_z^* angegeben.

Ein Anstieg des Luftdruckes im Spritzdüsenbereich bzw. Versuchsraum vergrößert die Luftdichte (Kompression) und dies bewirkt:

- Eine Verringerung der Einzelkornsinkgeschwindigkeit insbesondere von größeren Körnern (s. Tabelle 2.4/1) und
- unter Berücksichtigung der in Tabelle 2.4/1 angegebenen Materialbeladung μ eine Abnahme der Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Förderluft und damit eine Zunahme des Geschwindigkeitsverhältnisses $^c/_v$ (s. Bild 2.4/9) bei gleicher Materialgeschwindigkeit c

Die Änderung der oben genannten Größen beeinflußt nach Gleichung (7) des Kapitels 2.1.2 den Rohrreibungsbeiwert λ_z^*. In Bild 2.4/10 ist λ_z^* in Abhängigkeit des Luftdruckes im Spritzdüsenbereich bzw. Versuchsraumes dargestellt. Der Rohrreibungsbeiwert λ_z^* wird danach bei einer Zunahme des Luftdruckes bzw. der Luftdichte erheblich

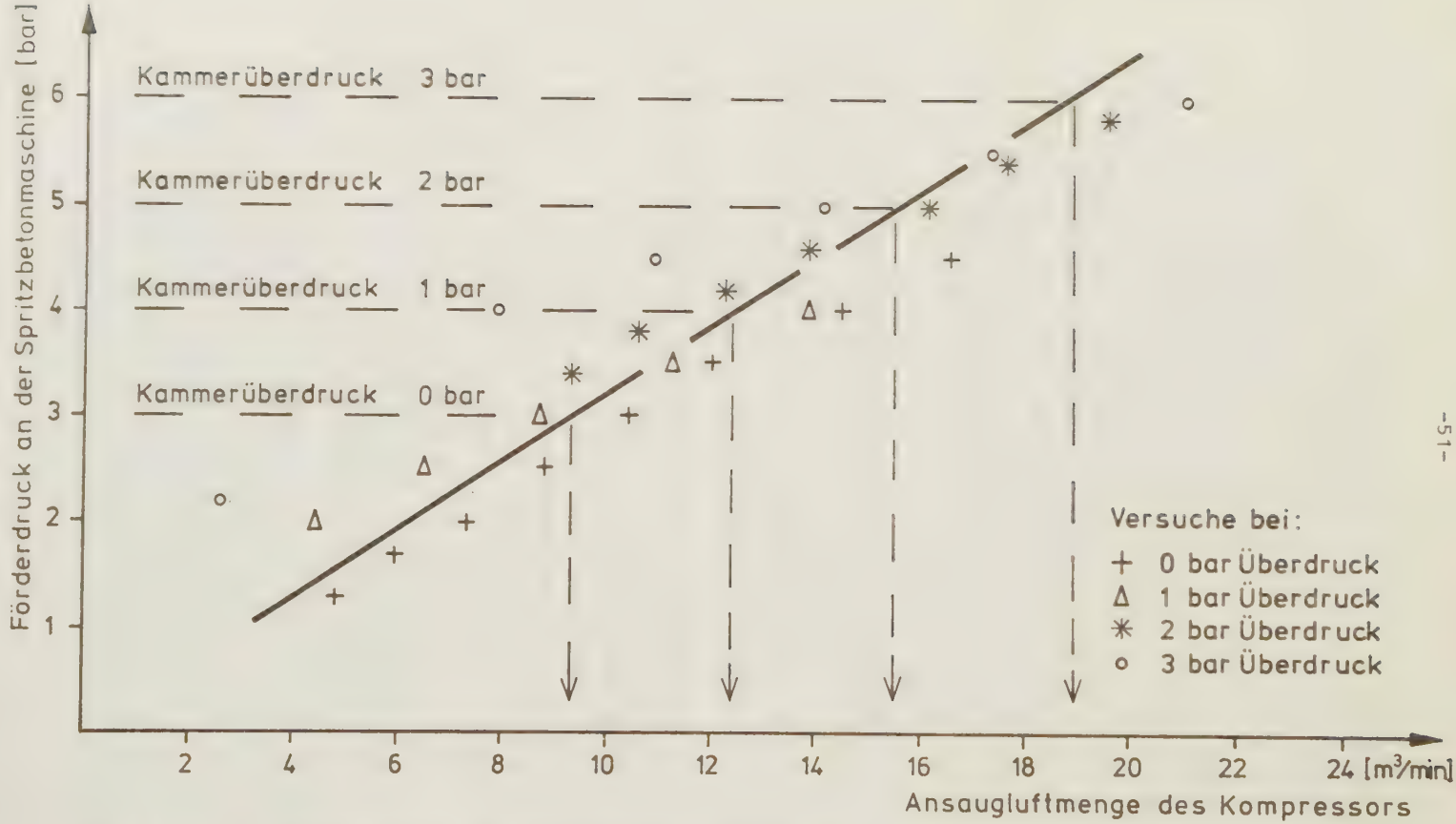


Bild 2.4/8: Ansaugluftmenge des Kompressors in Abhängigkeit vom erforderlichen Förderdruck an der Spritzbetonmaschine bei den untersuchten Kammerüberdrücken

Druck in der Versuchskammer bar (absolut)	Förderdruck p an der Spritzbetonmaschine bar (absolut)	Ansaugluftmenge Q des Kompressors i.M. m^3/min	Luftgeschwindigkeit v im Düsenbereich [1] m/s	Materialgeschwindigkeit c im Düsenbereich [2] m/s	Geschwindigkeitsverhältn. c/v -	Sinkgeschwindigkeit für ein Einzelkorn (Ø15 mm) [3] m/s	Rohrreibungsbeiwert [4] λ_z^* -	Materialbeladung μ ca. -
1	3,0	7,4	62,8	18	0,2866	32,5	0,0058	13
	3,5	8,9	75,5	21	0,2780		0,0063	10
	4,0	12,2	103,6	24	0,2318		0,0102	8
	4,5	14,6	123,9	27	0,2179		0,0120	6
2	4,0	8,8	37,4	18	0,4819	23,0	0,0021	11
	4,5	11,3	48,0	20	0,4170		0,0036	8
	5,0	14,0	59,4	23	0,3871		0,0046	7
3	5,0	12,4	35,1	18	0,5130	18,8	0,0025	8
	5,5	14,0	39,6	21	0,5301		0,0022	7
	6,0	16,3	46,1	23	0,4987		0,0028	6
	6,5	17,8	50,4	25	0,4964		0,0029	5
4	6,0	14,2	30,1	17	0,5642	16,3	0,0022	7
	6,5	17,5	37,1	21	0,5655		0,0022	5
	7,0	21,2	45,0	25	0,5557		0,0024	4

[1] nach Gleichung (5) in Kapitel 2.1.2

[2] Gemessen an Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 10 mm (≙15 mm Korndurchmesser)

[3] nach Gleichung (8) in Kapitel 2.1.2

[4] Nach Gleichung (7) in Kapitel 2.1.2 mit D = 0,05 m

Tabelle 2.4.1: Übersicht der wesentlichen Einflußgrößen der pneumatischen Spritzbetonförderung in Abhängigkeit vom Luftdruck in der Versuchskammer und vom Förderdruck an der Spritzbetonmaschine. Die in der Tabelle angegebenen Meßwerte p, Q und c wurden bei Trockenspritzbetonversuchen ermittelt.

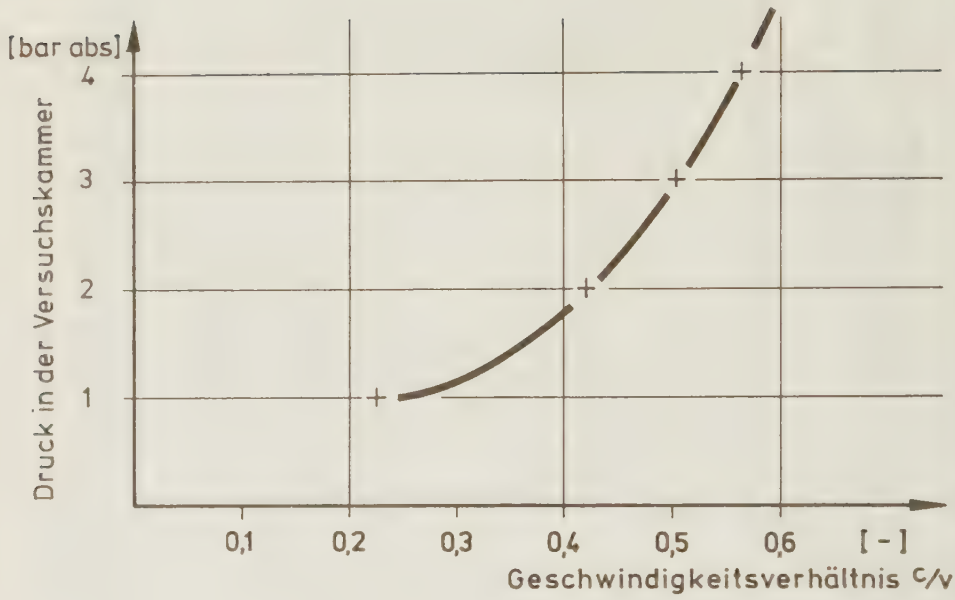


Bild 2.4/9: Geschwindigkeitsverhältnis $c/_v$ (c = Materialgeschwindigkeit für ein kugelförmiges Feststoffteilchen mit einem Durchmesser von 15 mm; v = zugehörige Förderdruckluftgeschwindigkeit) in Abhängigkeit vom Luftdruck (bzw. von der Luftdichte) im Versuchsraum nach Tabelle 2.4/1

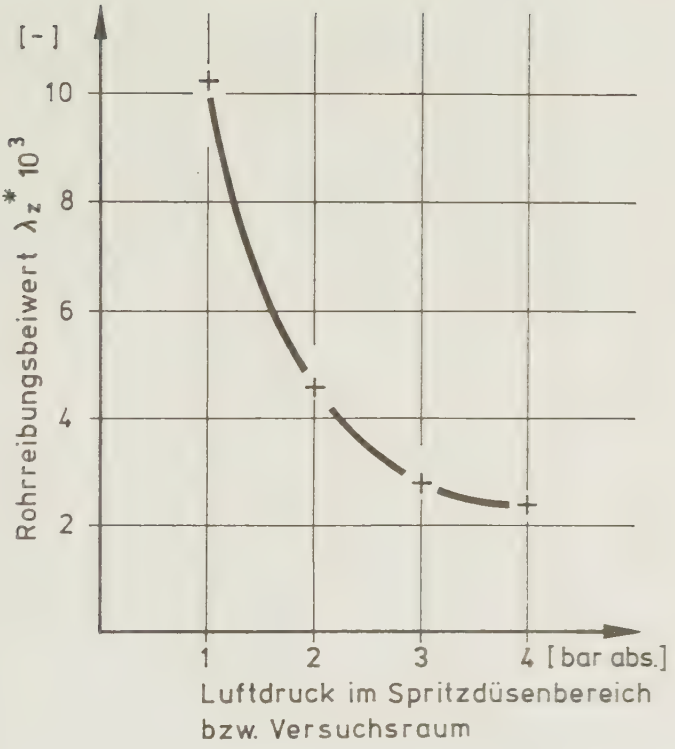


Bild 2.4/10: Rohrreibungsbeiwert λ_z^* bei der Spritzbetonförderung in Abhängigkeit vom Luftdruck in der Versuchskammer nach Tabelle 2.4/1

kleiner und ist nicht wie in Kapitel 2.1.2 angenommen unabhängig vom Luftdruck.

Mit Bild 2.4/9 kann unter Berücksichtigung der vorliegenden Voraussetzungen (s. Kapitel 2.1.2) für einen beliebigen Luftdruck im Tunnel bis 4 bar absolut das zugehörige Geschwindigkeitsverhältnis $^{c}/_{v}$ bestimmt werden. Wird ferner für die Materialgeschwindigkeit c ~ 25 m/s angenommen, so kann die Luftgeschwindigkeit v und die zugehörige Luftmenge Q nach Gleichung (5) des Kapitels 2.1.2 abgeschätzt werden. Mit Hilfe des Geschwindigkeitsverhältnisses $^{c}/_{v}$ und des Rohrreibungsbeiwertes λ_{z}^{*} (s. Bilder 2.4/9 und 2.4/10) können außerdem die zu erwartenden Druckverluste nach Kapitel 2.4.3 bestimmt werden.

2.4.3 Überschlägige Bestimmung des Gesamtdruckverlustes bei der Spritzbetonförderung

Im folgenden soll überschlägig der Gesamtdruckverlust beim Spritzvorgang in die Versuchskammer mit einem Kammerinnendruck von 1 bar absolut und 4 bar absolut bestimmt werden.
Der Gesamtdruckverlust einer pneumatischen Förderanlage setzt sich für eine horizontale Förderstrecke jeweils aus den Druckverlusten für Luft (reine Gasströmung) und Material zusammen. Vereinfachend soll dabei jedoch die Rückwirkung des Materials auf die Luftströmung vernachlässigt werden. Für den Gesamtdruckverlust gilt dann nach Günther [15]:

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{s_r} + \Delta p_{l_r} + \Delta p_{s_b} + \Delta p_{l_b} \qquad (1)$$

mit

Δp_{ges} = Gesamter Druckverlust

Δp_{s_r} = Druckverlust infolge der Reibung des Materials

Δp_{l_r} = Druckverlust infolge der Reibung der Luft

Δp_{s_b} = Druckverlust infolge der Materialbeschleunigung

Δp_{l_b} = Druckverlust infolge der Luftbeschleunigung

Es gilt ferner nach [15] bzw. [13]:

$$\Delta p_{s_r} = \frac{1}{2} \lambda_z \cdot \frac{1}{d} \cdot v^2 \cdot \mu \cdot \varrho \qquad (2)$$

$$\Delta p_{l_r} = \frac{1}{2} \lambda_l \cdot \frac{1}{d} \cdot v^2 \cdot \varrho \qquad (3)$$

$$\Delta p_{s_b} = c/_v \cdot v^2 \cdot \mu \varrho \qquad (4)$$

$$\Delta p_{l_b} = \frac{1}{2} v^2 \varrho \qquad (5)$$

mit λ_z = Widerstandszahl [-]
l = Schlauchlänge [m]
d = Rohrdurchmesser [m]
v = Förderluftgeschwindigkeit [m/s]
μ = Materialbeladung [-]
ϱ = jeweilige Luftdichte im Förderschlauch [kg/m³]
λ_1 = Rohrreibungsbeiwert der Luft [-]
$c/_v$ = Geschwindigkeitsverhältnis

Die Druckverluste werden vom Schlauchanfang aus bis zum Schlauchende ermittelt. Folgende Ausgangswerte gelten für die hier vorliegenden Bedingungen:

$$l_{ges} = 25 \text{ m}; \; d = 0{,}05 \text{ m}; \; \lambda_1 = 0{,}02$$

Die Materialbeladung μ beträgt

- für die Atmosphären-Versuche bei einem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine von 4 bar absolut (s. Tabelle 2.4/1): $\mu = 8$
- für die Überdruckversuche bei 4 bar absolut bei einem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine von 7 bar absolut (s. Tabelle 2.4/1): $\mu = 4$

Die Materialbeladung μ ist konstant über die Förderlänge.
Variabel sind demnach noch:
λ_z, v, $c/_v$ und ϱ

Der gemessene Druckverlauf ist Bild 2.4/11 zu entnehmen. Um die Druckverluste überschlägig bestimmen zu können, wird die Leitung in Abschnitte mit nur geringem Druckunterschied unterteilt, und für jedes Schlauchstück:

- die Luftgeschwindigkeit mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung (s. Kapitel 2.1.2, Gleichung (5)) bestimmt und
- die Widerstandszahl λ_z errechnet.

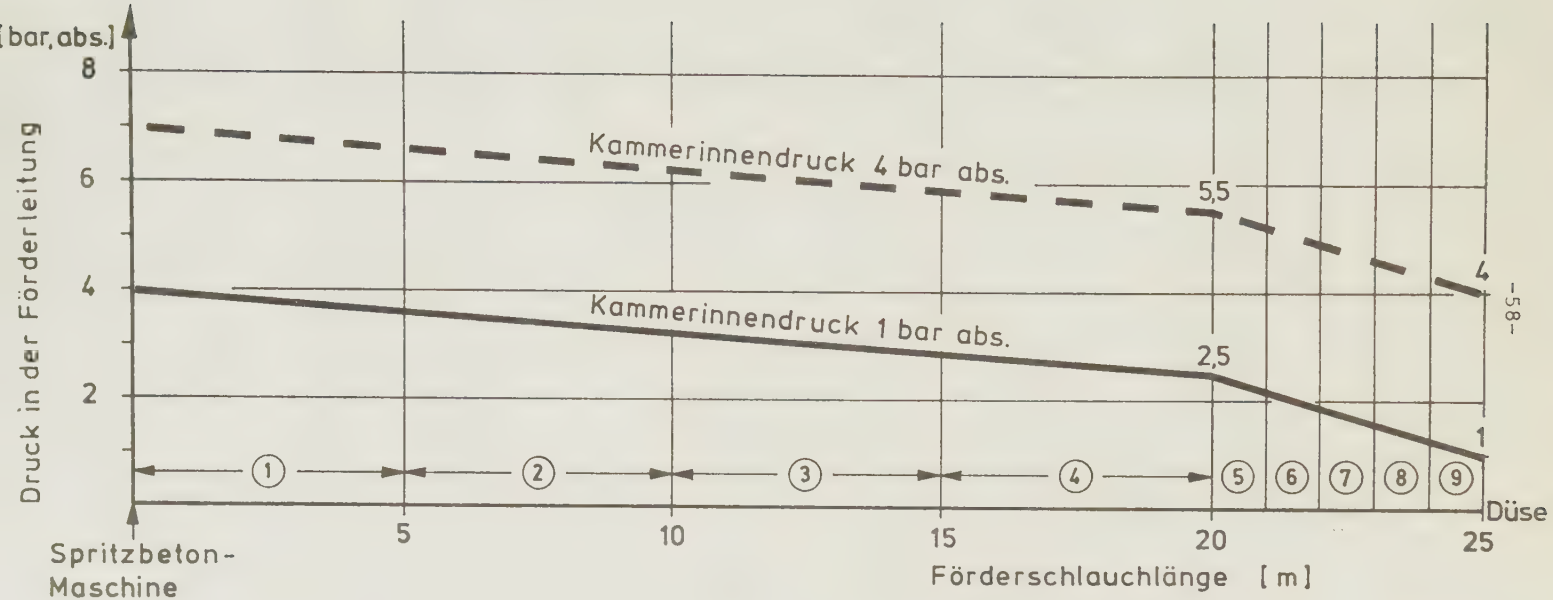


Bild 2.4/11: Gemessener Druckverlauf bei Spritzbetonförderung in die Versuchskammer entlang der Förderleitung. Der Luftdruck in der Versuchskammer beträgt 1 bar absolut bzw. 4 bar absolut

Für λ_z gilt nach [15]:

$$\lambda_z = \lambda_z^* \cdot c/_v + \frac{2 \cdot \beta}{F_r^2 \cdot c/_v} \qquad (6)$$

mit β = Reibungsbeiwert der Bewegung von Material (Zuschlag) gegen Leitungswand (Gummi): $\beta \sim 0{,}5$

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{d \cdot g}} = 1{,}43 \cdot v = \text{Froudezahl}$$

Das Geschwindigkeitsverhältnis $c/_v$ bzw. der Rohrreibungsbeiwert λ_z^* kann in Abhängigkeit des jeweiligen Druckes aus Bild 2.4/9 bzw. Bild 2.4/10 entnommen werden.
In Tabelle 2.4/2 sind die ermittelten Werte zur überschlägigen Bestimmung des Druckverlustes angegeben. Die Druckverluste sind in Tabelle 2.4/3 einander gegenübergestellt und in Bild 2.4/12 aufgetragen.

Für den Gesamtdruckverlust beim Spritzvorgang in der Atmosphäre erhält man nach Gleichung (1) bis (5):

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{s_r} + \Delta p_{l_r} + \Delta p_{s_b} + \Delta p_{l_b}$$

$$\Delta p_{ges} \sim 23{,}3 \cdot 10^3 + 25{,}1 \cdot 10^3 + 24{,}0 \cdot 10^3 + 6{,}0 \cdot 10^3$$

$$\Delta p_{ges} \sim 78000 \text{ Pa} \mathrel{\hat{=}} 0{,}78 \text{ bar}$$

Für den Gesamtdruckverlust beim Spritzvorgang in Druckluft (3 bar Überdruck) gilt nach Gleichung (1) bis (5):

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{s_r} + \Delta p_{l_r} + \Delta p_{s_b} + \Delta p_{l_b}$$

$$\Delta p_{ges} \sim 15{,}8 \cdot 10^3 + 34{,}4 \cdot 10^3 + 21{,}8 \cdot 10^3 + 4{,}9 \cdot 10^3$$

$$\Delta p_{ges} \sim 77000 \text{ Pa} \mathrel{\hat{=}} 0{,}77 \text{ bar}$$

	Druck in der Versuchskammer [bar, absolut]	Förderleitungs-Abschnitt nach Bild 2.4/11								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		l = 5 m	l = 5 m	l = 5 m	l = 5 m	l = 1 m	l = 1 m	l = 1 m	l = 1 m	l = 1 m
Druck in der Förderleitung [bar, abs.] nach Bild 2.4/11	1 bar	3,8	3,4	3,0	2,6	2,3	2,0	1,7	1,4	1,1
	4 bar	6,8	6,4	6,0	5,6	5,3	5,0	4,7	4,4	4,1
Luftdichte ϱ [kg/m³]	1 bar	4,67	4,18	3,69	3,20	2,83	2,46	2,09	1,72	1,35
	4 bar	8,36	7,87	7,38	6,89	6,52	6,15	5,78	5,41	5,04
Luftgeschwindigkeit [m/s] nach Kapitel 2.1.2 Gleichung (5)	1 bar	27,3	30,5	34,5	39,8	45,0	51,8	60,9	74,0	94,2
	4 bar	26,5	28,1	30,0	32,1	34,0	36,0	38,3	40,9	43,9
λ_z^* nach Bild 2.4/10	1 bar	0,0024	0,0025	0,0028	0,0033	0,0039	0,0046	0,0058	0,0070	0,0090
	4 bar	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024
Einzelkornsinkgeschwindigkeit [m/s] nach Kapitel 2.1.2 Gleichung (8)	1 bar	16,7	17,6	18,7	20,1	21,4	23,0	24,9	27,5	31,0
	4 bar	12,4	12,8	13,2	13,7	14,1	14,5	15,0	15,5	16,0
Geschwindigkeitsverhältnis c/v nach Kapitel 2.1.2 Gleichung (6)	1 bar	0,55	0,53	0,50	0,46	0,43	0,39	0,34	0,30	0,25
	4 bar	0,62	0,61	0,60	0,60	0,59	0,58	0,57	0,57	0,56
Widerstandszahl λ_z nach Kapitel 2.4.3 Gleichung (6)	1 bar	$2,5.10^{-3}$	$2,3.10^{-3}$	$2,2.10^{-3}$	$2,2.10^{-3}$	$2,2.10^{-3}$	$2,3.10^{-3}$	$2,4.10^{-3}$	$2,4.10^{-3}$	$2,5.10^{-3}$
	4 bar	$2,6.10^{-3}$	$2,5.10^{-3}$	$2,4.10^{-3}$	$2,2.10^{-3}$	$2,1.10^{-3}$	$2,1.10^{-3}$	$2,0.10^{-3}$	$1,9.10^{-3}$	$1,8.10^{-3}$

Tabelle 2.4/2: Gegenüberstellung der wesentlichsten Einflußgrößen zur Bestimmung des Druckverlustes bei der Spritzbetonförderung in der Versuchskammer. Der Luftdruck in der Versuchskammer beträgt 1 bar absolut bzw. 4 bar absolut.

Druck in der Versuchskammer	Druckverlust [pa]	Druckverlust im Förderleitungsabschnitt nach Bild 2.4/11								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 bar absolut	Δp_{sr}	3480	3577	3865	4461	1009	1215	1488	1808	2396
	Δp_{lr}	3480	3888	4392	5069	1146	1320	1550	1884	2396
	Δp_{sb}	15314	1173	1081	1086	1061	880	490	1521	1354
	Δp_{lb}	1740	204	252	338	331	435	576	833	1281
			24014	32856	42446	53399	56946	60796	64900	70946
	$\Sigma \Delta p$	24014	32856	42446	53399	56946	60796	64900	70946	78373
4 bar absolut	Δp_{sr}	3053	3107	3188	3124	633	670	678	688	699
	Δp_{lr}	5870	6214	6642	7100	1507	1594	1696	1810	1942
	Δp_{sb}	14560	602	778	1098	749	703	840	1303	1123
	Δp_{lb}	2935	172	214	229	319	216	254	286	332
			26418	36513	47335	58886	62094	65277	68745	72832
	$\Sigma \Delta p$	26418	36513	47335	58886	62094	65277	68745	72832	76928

Tabelle 2.4/3: Zusammensetzung des Druckverlustes für den Spritzvorgang in die Versuchskammer mit einem Kammerinnendruck von 1 bar absolut und 4 bar absolut in Abhängigkeit von der Förderleitungslänge.

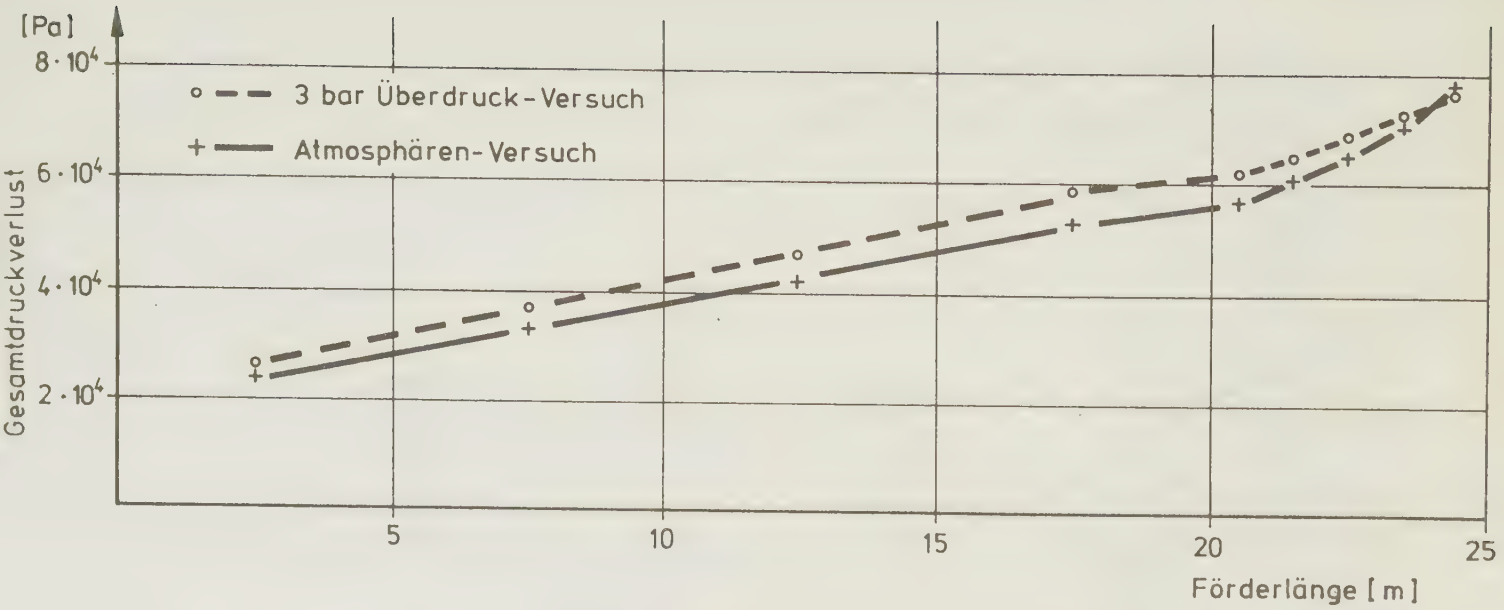


Bild 2.4/12: Druckverluste bei der Spritzbetonförderung in die Versuchskammer in Abhängigkeit von der Förderlänge. Der Kammerinnendruck beträgt 1 bar absolut bzw. 4 bar absolut.

Der Gesamtdruckverlust setzt sich beim Spritzvorgang in der Atmosphäre anders als beim Spritzvorgang in Druckluft (3 bar Überdruck) zusammen (Bild 2.4/13). Die Summe der einzelnen Druckverlustanteile ergeben jedoch in beiden Versuchsvarianten etwa den gleichen Gesamtdruckverlust. Hierdurch wird die richtige Wahl des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine nach Kapitel 2.4.1 bestätigt.

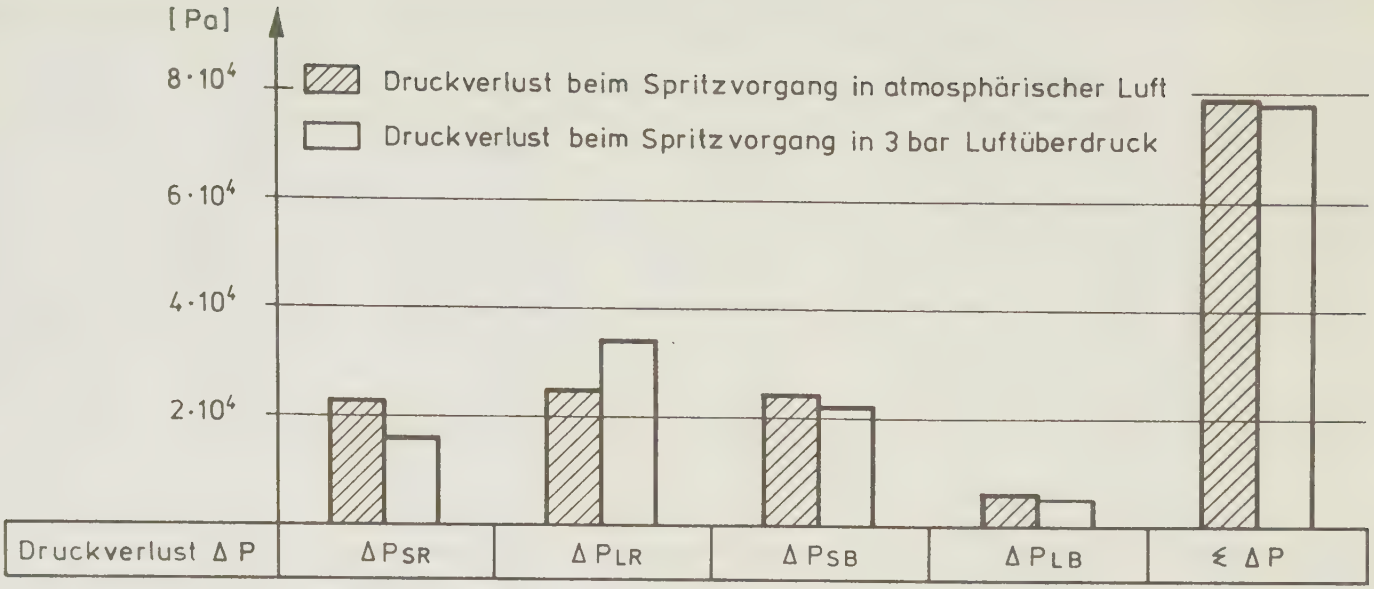


Bild 2.4/13: Zusammensetzung des Gesamtdruckverlustes für den Spritzvorgang in die Versuchskammer mit einem Kammerinnendruck von 1 bar absolut bzw. 4 bar absolut.

Index-Erläuterung: SR = Reibung des Materials;
SB = Materialbeschleunigung;
LR = Reibung der Luft;
LB = Luftbeschleunigung

2.5 Bestimmung des Einflusses von unterschiedlichen Förderdrücken auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons

Ziel dieser Versuche war es festzustellen, welchen Einfluß die Größe des Förderdruckes auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons hat. Dies ist insofern wichtig, da es grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden kann, daß sich ein anfangs exakt eingestellter Förderdruck an der Spritzbetonmaschine während des Spritzvorganges ändert. Es war nach den in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Versuchen zu erwarten, daß der Förderdruck auf die Frühdruckfestigkeit des Spritzbetons einen Einfluß hat. Um diese Problematik zu klären, wurden Spritzbetonversuche mit gleicher Ausgangsmischung und konstanter Wasserzugabemenge aber unterschiedlichem Förderdruck (2 bar bis 4 bar) in der Atmosphäre durchgeführt, und die Druckfestigkeit an Bohrkernen nach 28 h festgestellt. Die Versuchsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Im untersuchten Bereich nimmt die Druckfestigkeit des Spritzbetons nach 28 h mit steigendem Förderdruck (s. Bild 2.5/1) zu, insbesondere zwischen 2,5 bar auf 3,0 bar mit einem Anstieg um ca. 60 %. Hierbei ist die Änderung des W/Z-Wertes zu beachten.
- Bei konstantem Wassergehalt hat eine Vergrößerung des Zementgehaltes einen kleineren W/Z-Wert und dadurch eine größere Druckfestigkeit zur Folge. Dieser Zusammenhang ist durch Vergleich der Bilder 2.4/5 u. 2.5/1 ersichtlich. Eine zunehmend bessere Verdichtung des Betons mit steigendem Förderdruck konnte bei der Auswertung der Rohdichten nicht festgestellt werden.

Diese Versuche zeigen also, daß wegen des Einflusses auf die Frühfestigkeit der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine möglichst genau eingestellt werden sollte.

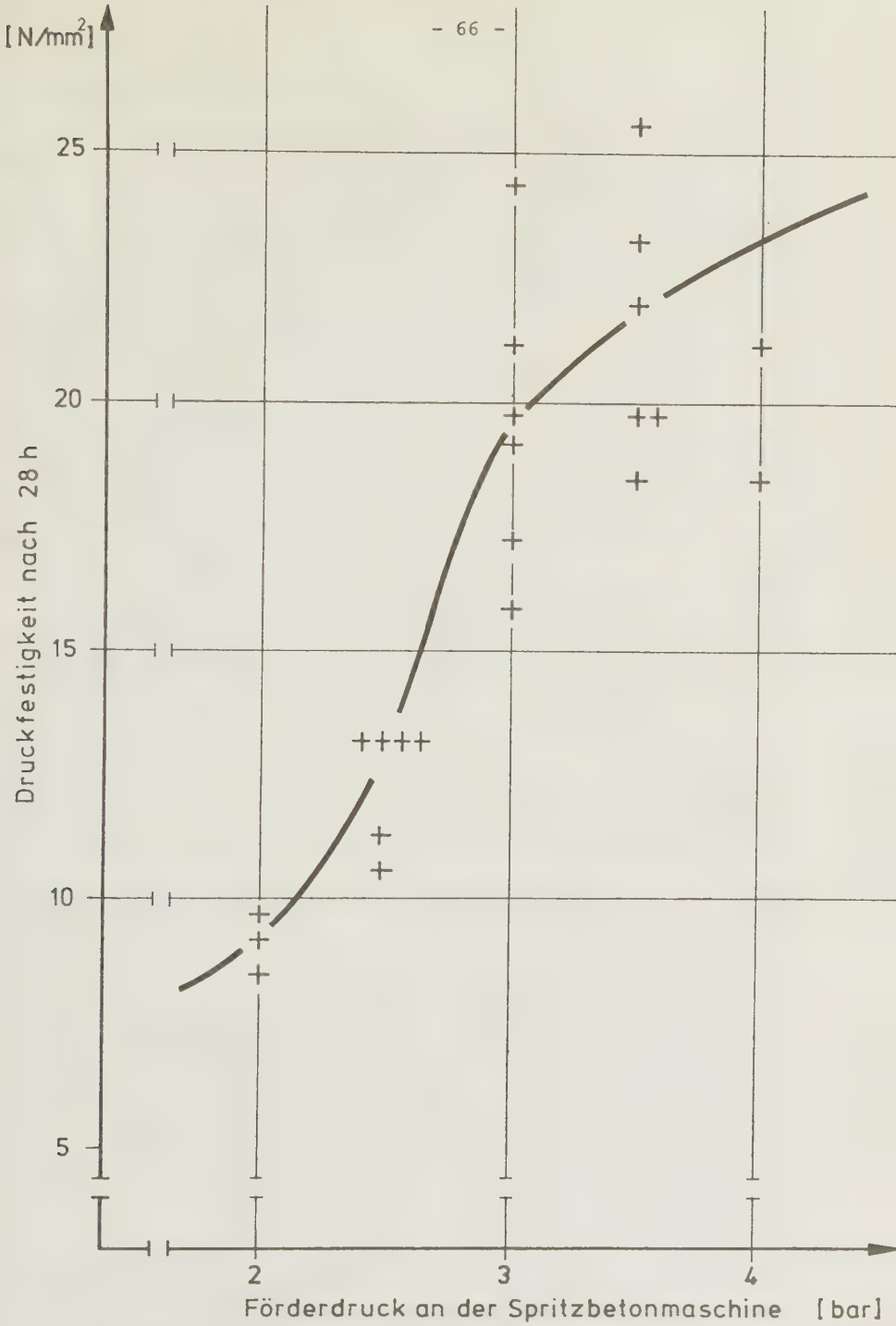


Bild 2.5/1: Spritzbetondruckfestigkeit nach 28 Stunden in Abhängigkeit vom Förderdruck an der Spritzbetonmaschine. Die Druckfestigkeit wurde anhand von Bohrkernen (Ø = 10 cm, h/d = 1) ermittelt.

2.6 Ermittlung des Einflusses von verschiedenen Wasserzugabemengen auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons

Da mit einer gemeinsamen Ausgangsmischung sowohl Probekörper in der Atmosphäre als auch im Überdruckbereich hergestellt wurden, war es für den direkten Vergleich beider Spritzbetonproben in erster Linie wichtig, daß bei diesen parallel durchgeführten Spritzvorgängen auch die gleiche Wassermenge (konstanter W/Z-Wert) zugegeben wurde. Wenn dies - aus welchen Gründen auch immer - nicht der Fall war, dann mußte die Frage geklärt werden, wie sich eine unterschiedliche Wasserzugabe auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons auswirkt. Denn anders als beim Rüttelbeton ist beim Spritzbeton eine geringfügige Selbstregulierung im Bereich der Wasseraufnahme durch den Spritzvorgang und Rückprall nicht völlig auszuschließen. Um diese Frage zu beantworten, wurde im Rahmen dieser Versuche Spritzbeton mit gleicher Ausgangsmischung und gleichem Förderdruck, aber unterschiedlicher Wasserzugabemenge, in der Atmosphäre hergestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Druckfestigkeit nach 28 h bei konstantem Zementgehalt und steigender Wasserzugabemenge und damit wachsendem W/Z-Wert bei konstanter Eigenfeuchte der Ausgangsmischung ab (s. Bild 2.6/1). Der Einfluß der Größe der zugegebenen Wassermenge auf die Druckfestigkeit des Spritzbetons nimmt mit zunehmendem Alter der Proben ab (s. Bild 2.6/2).

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, daß bei Spritzbeton keine erkennbare Selbstregulierung im Hinblick auf die Wasseraufnahme stattfindet. Die Wasserzugabemenge darf sich bei konstanter Eigenfeuchte der Ausgangsmischung bei beiden Spritzvorgängen (in der Atmosphäre und im Überdruckbereich) deshalb nur wenig unterscheiden. Die jeweils erforderliche Wasserzugabemenge wurde mit Hilfe eines Durchflußmessers und entsprechenden Regeleinrichtungen eingestellt und während des Spritzvorganges überwacht (s. Bild 2.2/3). Der Gesamtwassergehalt (Eigenfeuchte plus Zugabewasser) im aufgetragenen Spritzbeton betrug etwa 160 l/m³ bis 170 l/m³.

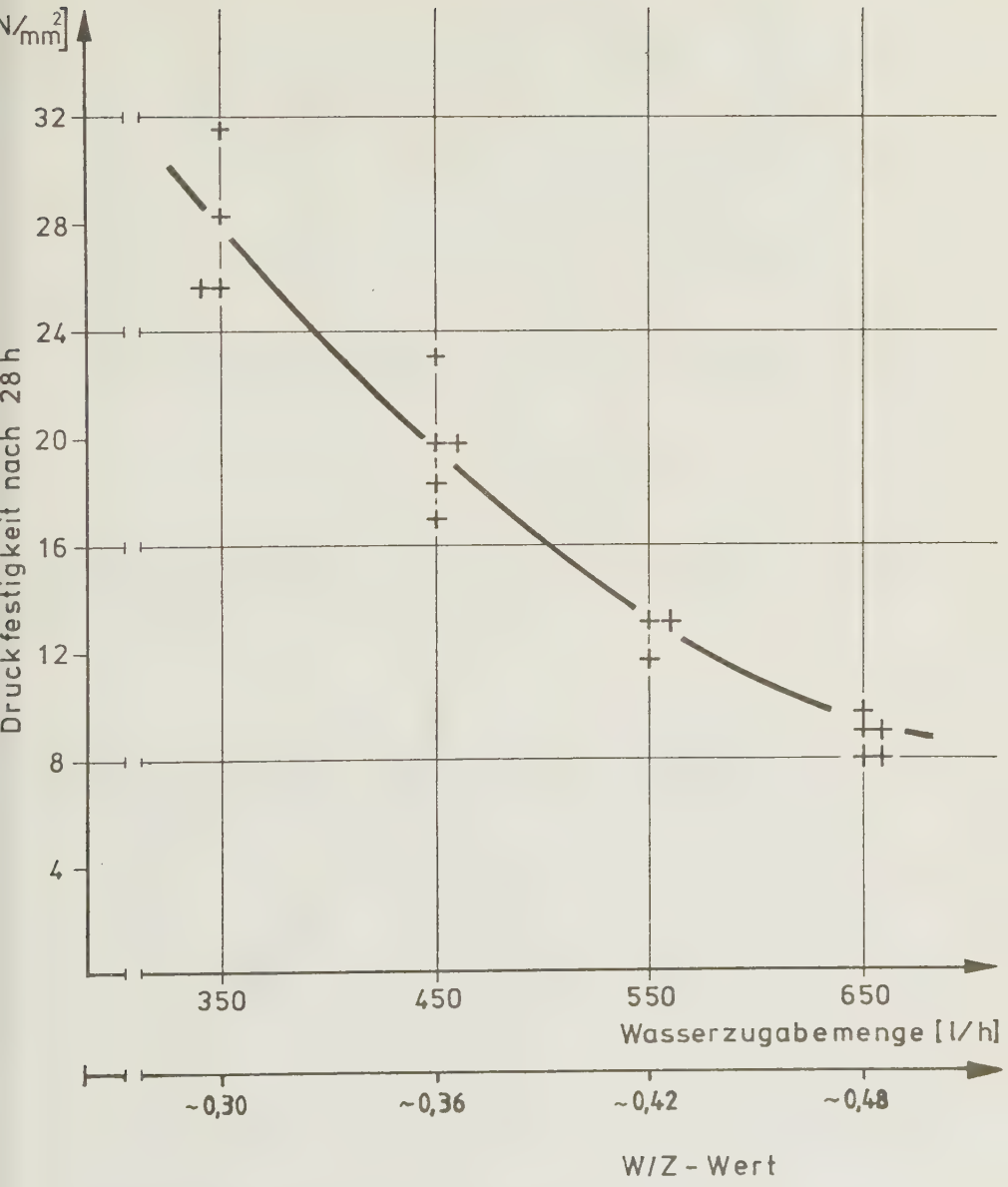


Bild 2/6.1: Spritzbetondruckfestigkeit nach 28 Stunden in Abhängigkeit von der Wasserzugabemenge (Eigenfeuchte der Ausgangsmischung ca. 2 %) Die Druckfestigkeit wurde anhand von Bohrkernen (Ø = 10 cm; h/d = 1) ermittelt.

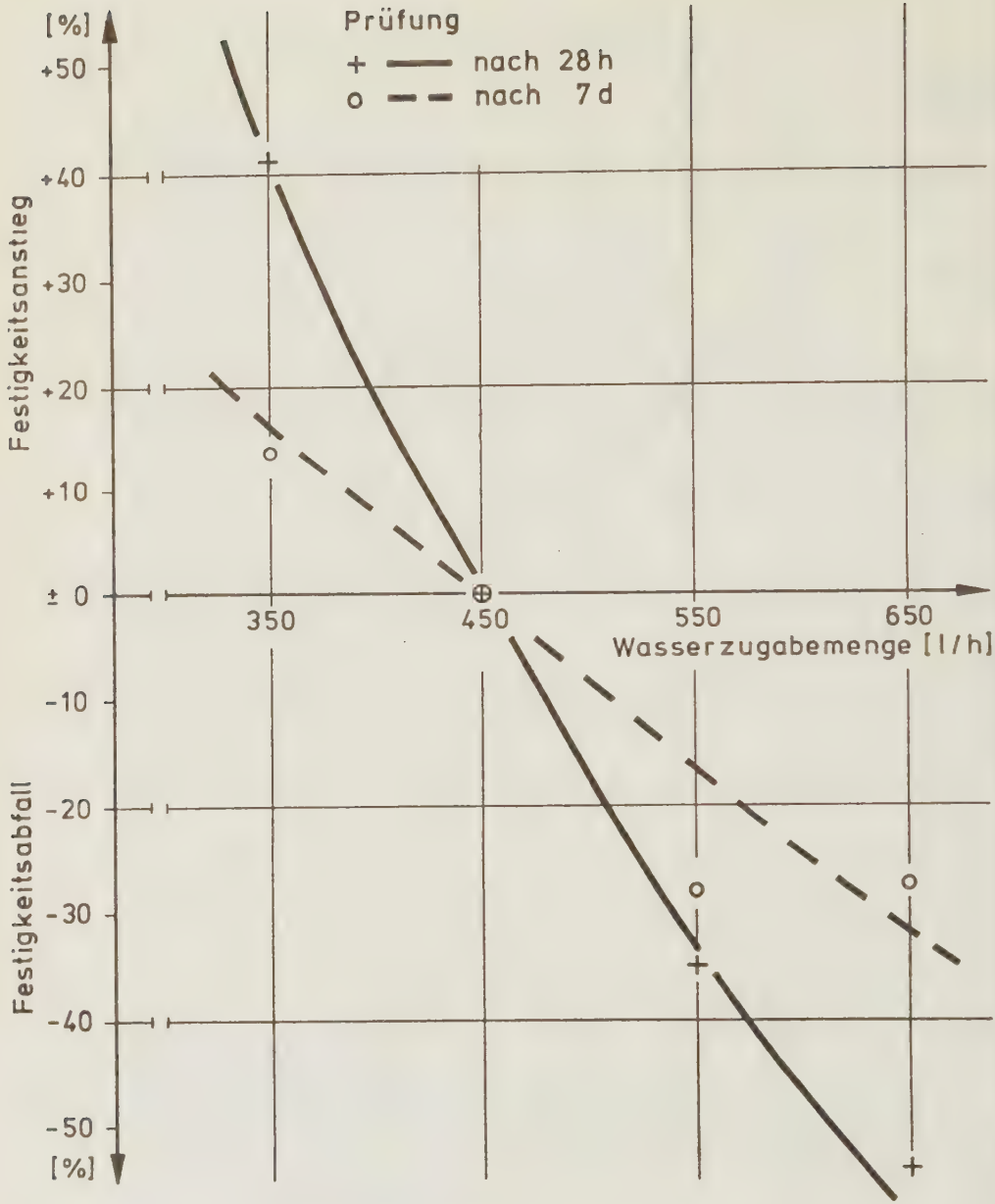


Bild 2.6/2: Prozentualer Anstieg bzw. Abfall der Spritzbetondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Wasserzugabemenge und vom Probenalter (Eigenfeuchte der Ausgangsmischung ca. 2 %) Zugehöriger W/Z-Wert zur Wasserzugabemenge siehe Bild 2.6/1.

2.7 Druckfestigkeitsversuche

2.7.1 Druckfestigkeitsversuche in der Druckkammer und auf dem Atmosphären-Prüfstand

Insgesamt wurden 64 Druckfestigkeitsversuche durchgeführt. Die Tabelle 2.7/1 zeigt hierzu eine Übersicht. Um den Einfluß der Druckluft auf den Spritzbeton untersuchen zu können, wurden die Spritzbetonproben in der Atmosphäre und im Überdruckbereich mit einer gemeinsamen Ausgangsmischung hergestellt. Einzelheiten sind den entsprechenden Kapiteln direkt zu entnehmen:

- Zusammensetzung der Spritzbetonausgangsmischung und Prüfung der Spritzbetonproben siehe Kapitel 2.2,
- eingesetzte Maschinen, siehe Anhang
- der gewählte Förderdruck an der Spritzbetonmaschine siehe Kapitel 2.4.1 und
- erforderlicher Luftmengenbedarf siehe Kapitel 2.4.2

2.7.2 Ergänzende Druckfestigkeitsversuche auf der Baustelle

Auf der Baustelle U-Bahnbaulos 5/9-5 Theresienwiese, München, wurden nacheinander zwei Schildröhren mit Druckluftwasserhaltung aufgefahren. Am Ende jeder Röhre wurde eine Kaverne in Spritzbetonbauweise (Durchmesser ca. 7,50 m; Länge 9,5 m bzw. 14,5 m) hergestellt, um Platz für den Ausbau der Schildvortriebsmaschine zu haben. Diese Baustelle eignete sich deshalb besonders für ergänzende Spritzbetonversuche in Druckluft.

Vorrangiges Ziel der Druckfestigkeitsversuche auf der Baustelle war es, die Auswirkungen von Druckabfällen auf Spritzbetonproben im Sohl- und Firstbereich sowie die Frühfestigkeitsentwicklung in Druckluft in den ersten Stunden nach dem Spritzen zu untersuchen, da in der Versuchskammer nur Proben im Ulmenbereich (senkrecht) gespritzt werden konnten, und die Kammer für Frühfestigkeitsuntersuchungen nicht begehbar war. Zur Zeit der Versuche

Lfd. Nr.	Anzahl der Versuche	Luftüberdruck in der Versuchskammer in bar			Luftdurchlässigkeit des Haftgrundes 1)		Spritzbetondicke in cm		BE-Mittel Zugabe		Druckabfall im Überdruckbereich ca. Stunden nach dem Spritzen 2)						Wasser am jungen Spritzbeton 3)
		1	2	3	ja	nein	~10	~20	ja	nein	≤2h	4h	8h	12h	16h	20h	
-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	x				x		x		x						x	
2	3	x			x			x		x						x	
3	1	x				x	x			x						x	
4	3	x				x	x			x	x						
5	5		x			x		x		x						x	
6	3		x		x			x		x						x	
7	2		x			x		x		x	x						
8	1		x		x			x		x	x						
9	1		x		x		x		x							x	
10	3		x			x	X			x	x						
11	1		x			x	X		x		x						
12	1		x			x	X		x					x			
13	2		x		x		x		x							x	x
14	4			x		x		x		x						x	
15	4			x	x			x		x						x	
16	1			x		x	x			x						x	
17	5			x	x		x			x						x	
18	1			x		x	X		x							x	
19	4			x	x		x		x							x	
20	4			x		x	x			x	x						
21	1			x		x	x			x		x					
22	1			x		x	x			x			x				
23	1			x		x	x			x				x			
24	1			x		x	x			x					x		
25	3			x		x	x		x		x						
26	3			x		x	x		x			x					
27	2			x		x	x		x				x				
28	1			x		x	x		x					x			
29	1			x	x		x		x							x	x

1) Von 0 m³/min bis 20 m³/min bei 1 bar absolut
Differenzdruck zwischen beiden Druckräumen 0 bis 0,6 bar

2) Geschwindigkeit des Druckabfalls 2 bar/h

3) 400 l/h etwa 20 Std. lang, beginnend 2 Std. nach dem Spritzen

Tabelle 2.7/1: Übersicht der durchgeführten Versuchsvarianten bei den Druckfestigkeitsversuchen

betrug der Überdruck im Tunnel ca. 1 bar. Folgende Versuche mit Druckabfällen wurden durchgeführt:

(1) Es wurden Probeschalungen mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm x 15 cm innenseitig mit Streckmetall ausgelegt und im First- bzw. Sohlbereich des Druckluftunnels und der Materialschleuse aufgebaut (s. Bild 2.7/1). Diese Versuche konnten nur an arbeitsfreien Wochenenden durchgeführt werden, um den Baufortschritt nicht zu behindern. Deshalb mußten diese Proben (Dicke ca. 10 cm) mit nachfolgender Ausgangsmischung (Sakret; Mischung 1) gespritzt werden:

- Zement: PZ 35 F; 370 kg/m³
- Zuschlag: Sieblinie B_8
- BE-Mittel: 4 % des Zementgewichtes (MC-Bauchemie)

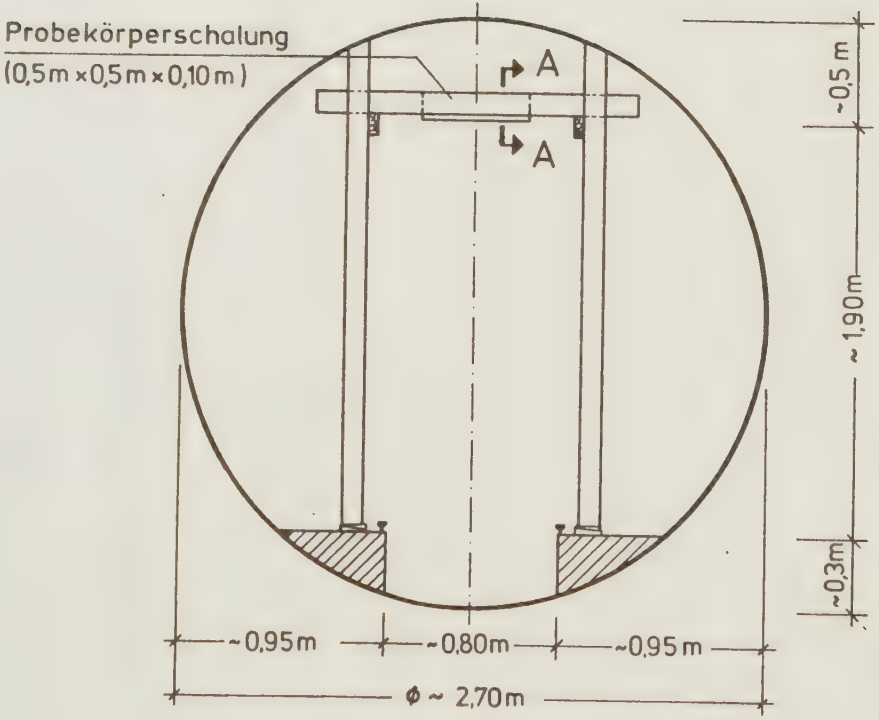
Der Trockenbeton (Sakret) wurde sackweise in einem Freifallmischer (Größe ca. 50 l) auf 3 % Eigenfeuchte der Gesamtmischung vor dem Spritzen vorbefeuchtet.

In der Materialschleuse wurde der Luftdruck (ca. 1 bar) je nach Versuch unmittelbar 1 Stunde bzw. 4 Stunden nach dem Spritzen auf atmosphärischen Luftdruck abgesenkt. Die im Drucklufttunnel hergestellten Vergleichsprobekörper wurden erst ca. 20 Stunden nach dem Spritzen ausgeschleust.

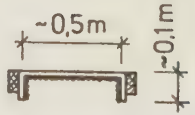
(2) Weitere Spritzbetonprobekörper wurden mit der auf der Baustelle "Theresienwiese" üblichen Spritzbetonausgangsmischung (Mischung 2) hergestellt. Sie bestand aus:

- Zement: PZ 35 F; 380 kg/m³
- Zuschlag: Sieblinie B_{16}
- Eigenfeuchte der Ausgangsmischung: ca. 3 %

Mit dieser Mischung wurden Probeplatten im Sohlbereich (Abmessungen~50 cm x 50 cm x 10 cm) ohne BE-Mittel-Zugabe und Firstbereich (Abmessungen~2 m x 1 m x 0,05 m)



Schnitt A-A



Holzschalung (ungehobelte Bretter) mit Streckmetall ausgelegt

Bild 2.7/1: Versuchsaufbau zum Spritzen der Firstplatten in der Materialschleuse des Druckluftunnels

mit BE-Mittel-Zugabe (MC-Spritzhilfe; Zugabemenge ca. 6 % des Zementgewichtes) hergestellt.

Die Sohlplatten wurden 3 h/ 4 h/ 8 h/ 12 h/ 16 h und 20 Stunden nach dem Spritzen ausgeschleust.

Die Firstplatten wurden in der Materialschleuse gespritzt (s. Bild 2.7/2), deren Überdruck (ca. 1 bar) etwa 20 Minuten nach dem Spritzen auf atmosphärischen Luftdruck abgesenkt wurde.

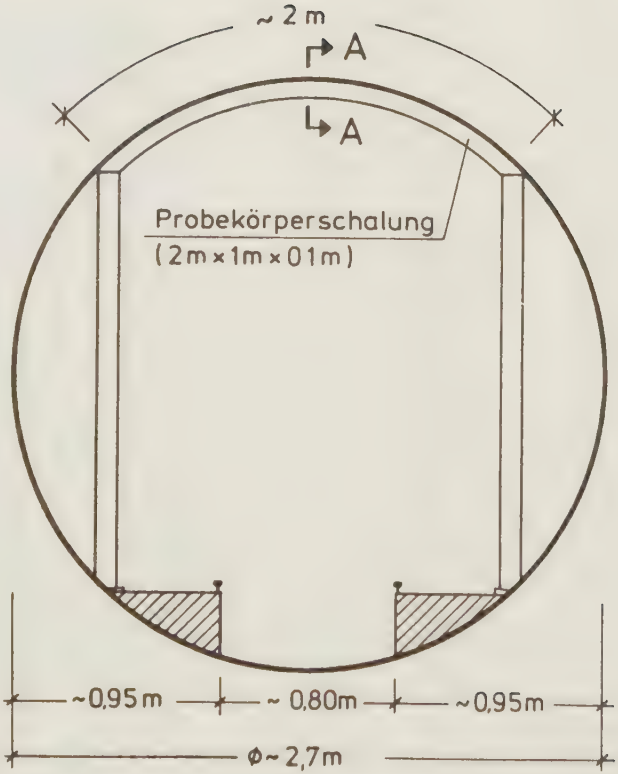
Tabelle 2.7/2 gibt einen Überblick über die Druckfestigkeitsversuche mit Druckabfällen auf der Baustelle.

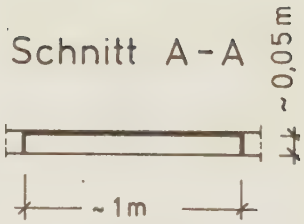
Außerdem wurde mit Hilfe des Kaindl-Meyco-Gerätes [36] die Frühdruckfestigkeit des Spritzbetons in Druckluft bestimmt. Hierzu wurden ca. 10 Bolzen 2 h/ 4 h/ 6 h/ 8 h/ 12 h/ 16 h und 20 Stunden nach dem Spritzen in der Kaverne gezogen.

2.7.3 Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche

Obwohl die Versuchsergebnisse strenggenommen nur für die vorliegenden Ausgangsbedingungen (Maschineneinsatz, Ausgangsmischung usw., siehe Kapitel 2.7.1 und 2.7.2) gelten, rechtfertigen die Beobachtungen die Annahme, daß sie tendenziell auch durch die allgemeine Praxis bestätigt werden:

(1) Wenn die Luftdurchlässigkeit des Haftgrundes und der Differenzdruck zwischen beiden Druckräumen (vgl. Kapitel 2.1) zu Null eingestellt wurden, so konnten etwa gleiche Druckfestigkeiten der Normal- und Überdruckproben bei einer Prüfung nach 28 Stunden, 7 Tagen und 28 Tagen festgestellt werden (s. Tabelle 2.7/3). Ein Beispiel für den Druckfestigkeitsverlauf des Spritzbetons in Abhängigkeit vom Alter ist Bild 2.7/3 zu entnehmen. Ein Einfluß der Überdruckhöhe war nicht feststellbar.





Holzschalung (ungehobelte Bretter)

Bild 2.7/2: Versuchsaufbau zum Spritzen der großen Firstplatten in der Materialschleuse des Drucklufttunnels

Lfd. Nr.	Anzahl der Versuche	Luft-Überdruck im Tunnel ca.	Probenlage First	Probenlage Sohle	Probenabmessung 50 cm x 50 cm x 10 cm	Probenabmessung 2 m x 1 m x 0,05 m	BE-Mittel-Zugabe ja	BE-Mittel-Zugabe nein	Druckabfall im Überdruckbereich ca. Stunden nach dem Spritzen 2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	Spritzbetonmischung
1	3	1,0	x	-	x	-	x	-	x[1)]	-	-	-	-	-	Mischung 1
2	1	1,0	x	-	x	-	x	-	-	x	-	-	-	-	
3	1	1,0	-	x	x	-	x	-	x[1)]	-	-	-	-	-	
4	1	1,0	-	x	x	-	x	-	-	x	-	-	-	-	
5	2	1,0	-	x	x	-	-	x	x[2)]	-	-	-	-	-	Mischung 2
6	2	1,0	-	x	x	-	-	x	-	x	-	-	-	-	
7	2	1,0	-	x	x	-	-	x	-	-	x	-	-	-	
8	2	1,0	-	x	x	-	-	x	-	-	-	x	-	-	
9	2	1,0	-	x	x	-	-	x	-	-	-	-	x	-	
10	2	1,0	-	x	x	-	-	x	-	-	-	-	-	x	
11	2	1,0	x	-	-	x	x	-	x[3)]	-	-	-	-	-	

[1)] Druckabfall nach ca. 1 Std.

[2)] Druckabfall nach ca. 3 Std.;

[3)] Druckabfall nach ca. 20 Minuten

Tabelle 2.7/2: Übersicht der ergänzenden Druckfestigkeitsversuche auf der Baustelle

Luftüberdruck in der Versuchskammer in bar	Bezogene Druckfestigkeit der Überdruckprobe[1]		Bemerkung
	Einzelwert	i. M.	
1	0,98 1,02	1,00	ohne BE-Mittel ohne BE-Mittel
2	1,07 1,04	1,06	ohne BE-Mittel ohne BE-Mittel
3	1,06 0,96 0,99 1,09 1,00 1,00	1,02	ohne BE-Mittel ohne BE-Mittel ohne BE-Mittel ohne BE-Mittel mit BE-Mittel[2] mit BE-Mittel[2]

[1] Druckfestigkeit der Atmosphären-Proben wurde zu 1,00 gesetzt

[2] Addiment (s. Kapitel 2.2)

Tabelle 2.7/3: Bezogene Druckfestigkeit der in Druckluft hergestellten Spritzbetonproben bei luftundurchlässigem Haftgrund. Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte nach 28 Stunden anhand von Bohrkernen (Ø = 100 mm; h/d = 1).

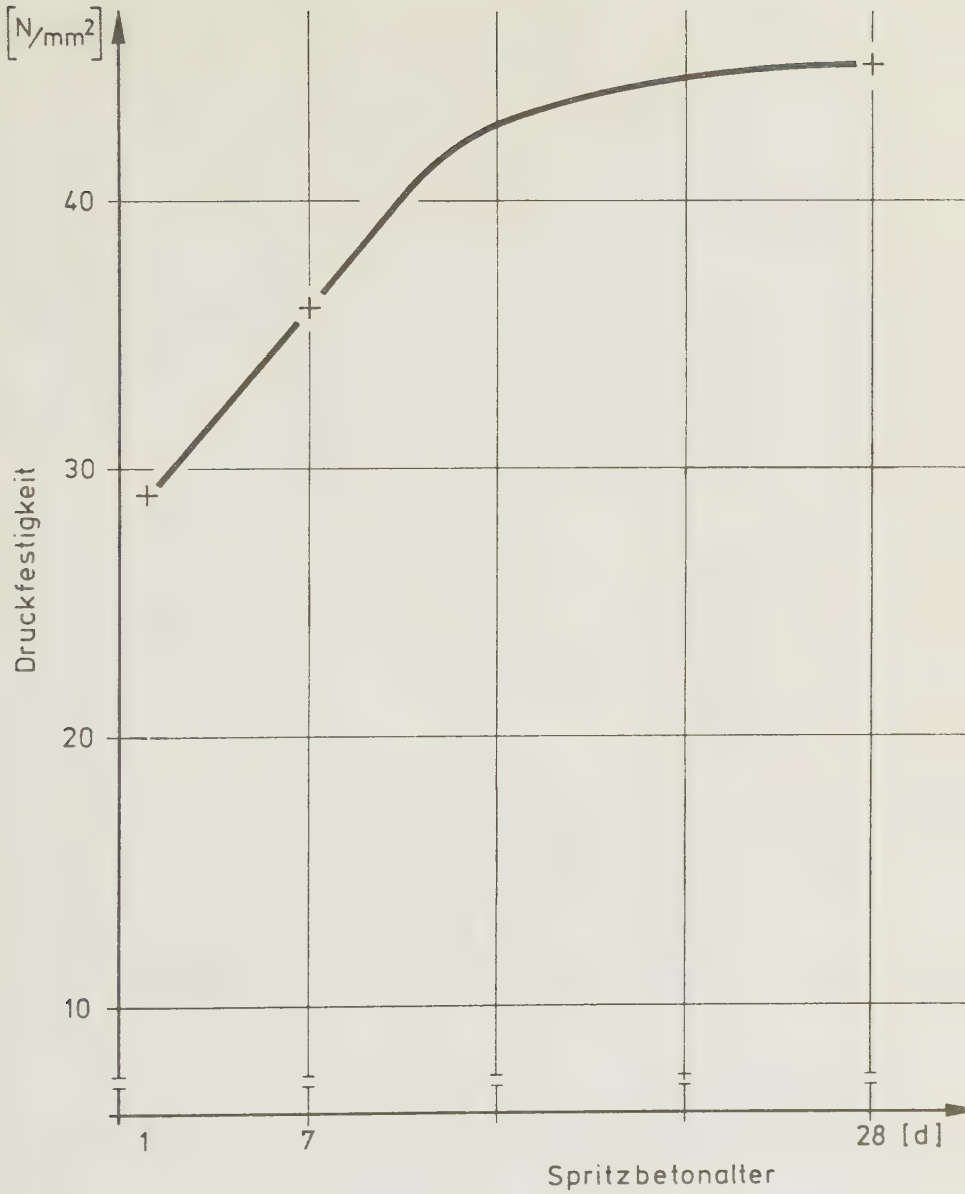


Bild 2.7/3: Beispiel für den Druckfestigkeitsverlauf des in Druckluft hergestellten Spritzbetons (ohne BE-Mittel; Ausgangsmischung siehe Kapitel 2.2). Die Druckfestigkeit wurde anhand von Bohrkernen (Ø = 10 cm; h/d = 1) ermittelt.

(2) Wenn sich ein Differenzdruck von ca. 0,5 bar zwischen beiden Druckräumen aufbaute, und dadurch Luft den Porenkörper durchströmte, so waren die nach 28 h gemessenen Druckfestigkeiten der Überdruckproben (kurz "Differenzdruckproben" genannt) um ca. 20 % höher als die der Normal- bzw. der Überdruckproben, die ohne Differenzdruck hergestellt wurden (s. Tabelle 2.7/4). Die Überprüfung der zugehörigen Spritzbetonrohdichten von je ca. 40 Proben ergab, daß die Rohdichten der Differenzdruckproben i. M. um ca. 1 % höher liegen als diejenigen Rohdichten der Überdruckproben, die ohne Differenzdruck hergestellt wurden. Die durchgeführten Betonanalysen unmittelbar nach dem Spritzen bei Spritzbetonversuchen in der Druckkammer mit und ohne Differenzdruck ließen keine wesentlichen Differenzen erkennen.

(3) Die Druckluft beeinträchtigt den Verlauf der Frühdruckfestigkeit des Spritzbetons nicht negativ (s. Bild 2.7/4). So wurde z. B. die von der Stadt München für bestimmte Vortriebsweisen und Vortriebszustände verlangte Druckfestigkeit des Spritzbetons von 5 N/mm² im Betonalter von 6 Stunden sicher erreicht.

(4) Wenn man ab ca. 2 Stunden nach dem Spritzen (der Ausgangsmischung wurde ein BE-Mittel in üblicher Dosierung zugegeben) Wasser (der Wasserdruck im zweiten Druckraum entspricht etwa dem Luftdruck im ersten Druckraum) am Haftgrund (Heraklithplatten) des jungen Spritzbetons vorbeiströmen läßt (ca. 400 l/h), so beeinflußt dies die Druckfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons nicht negativ. Zementauswaschungen - die theoretisch nicht auszuschließen waren - konnten nicht festgestellt werden.

(5) Ein Druckabfall im Überdruckbereich (Versuchskammer bzw. Tunnel) in den ersten Stunden(bis zu maximal ca. 16 Stunden) nach dem Spritzen kann zu Schädigungen des Spritzbetons führen, die je nach der bereits vorhandenen Zugfestigkeit und der Beanspruchung des Spritzbetons zum Zeitpunkt des Druckabfalls unterschiedlich sind. Inwieweit die Geschwindigkeit des

Luftüberdruck in der Versuchskammer in bar	Bezogene Druckfestigkeit der Überdruckprobe[1]		Bemerkung
	Einzelwert	i. M.	
1	1,19	1,17	ohne BE-Mittel
	1,15		ohne BE-Mittel
2	1,40	1,27	ohne BE-Mittel
	1,35		ohne BE-Mittel
	1,12		ohne BE-Mittel
	1,20		mit BE-Mittel[2]
3	1,34	1,22	ohne BE-Mittel
	1,29		ohne BE-Mittel
	1,09		ohne BE-Mittel
	1,17		ohne BE-Mittel
	1,15		ohne BE-Mittel
	1,13		ohne BE-Mittel
	1,37		ohne BE-Mittel
	1,23		ohne BE-Mittel
	1,12		ohne BE-Mittel
	1,25		mit BE-Mittel[3]
	1,23		mit BE-Mittel[3]

[1] Druckfestigkeit der Atmosphären-Proben wurde zu 1,00 gesetzt

[2] Addiment (s. Kapitel 2.2)

[3] Barra Gunit (s. Kapitel 2.2)

Tabelle 2.7/4: Bezogene Druckfestigkeit der in Druckluft hergestellten Spritzbetonproben bei luftdurchlässigem Haftgrund. Die Druckfestigkeiprüfung erfolgte nach 28 Stunden anhand von Bohrkernen (Ø = 100 mm; h/d = 1).

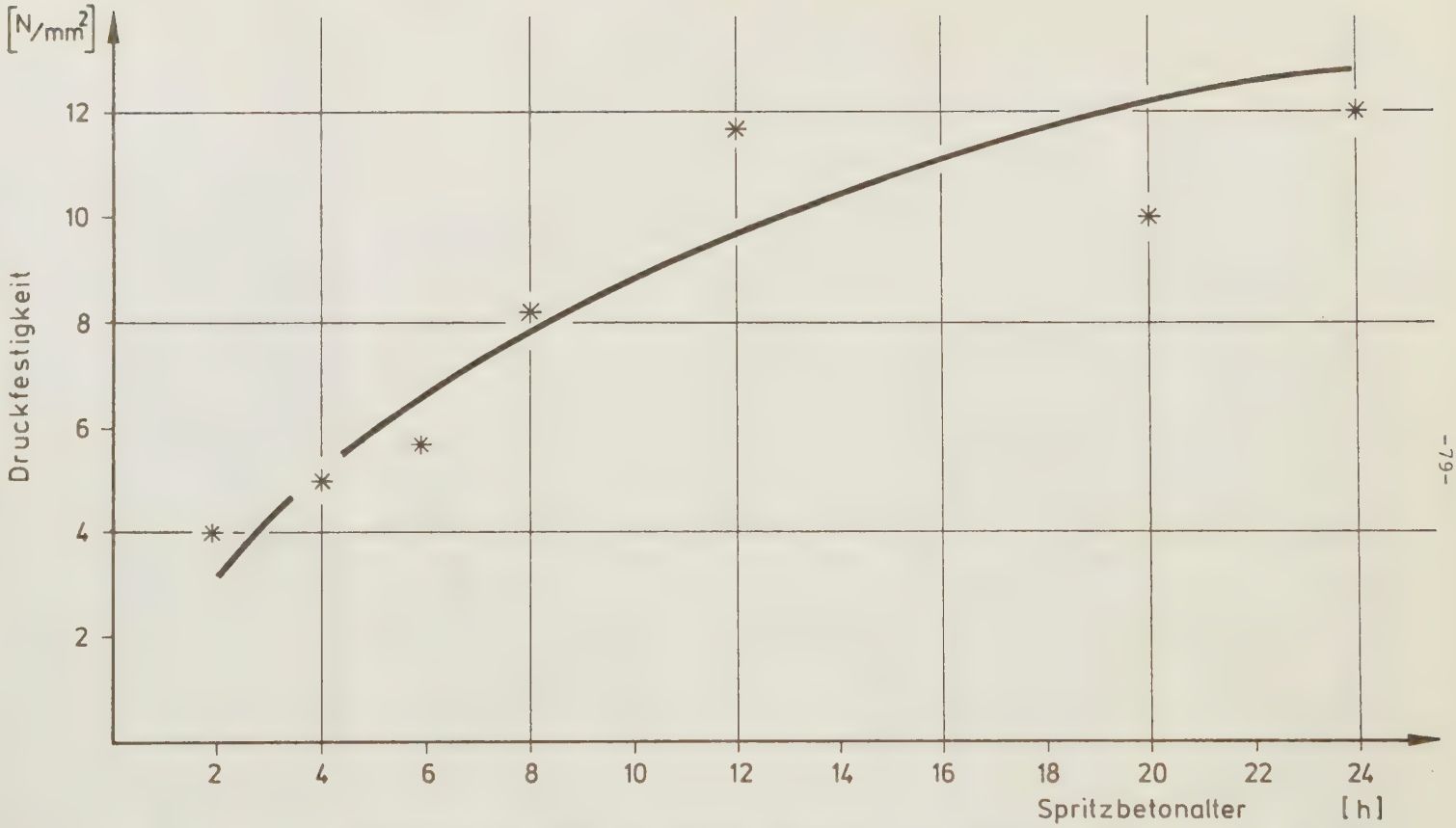


Bild 2.7/4: Frühdruckfestigkeitsverlauf des Spritzbetons mit BE-Mittel-Zugabe (MC-Spritzhilfe, Zugabemenge ca. 4 % des Zementgewichtes) in Druckluft. Die Druckfestigkeiten wurden mit Hilfe des Kaindl-Meyco-Gerätes [36] auf einer Druckluftbaustelle in München ermittelt.

Druckabfalles von Bedeutung ist, konnte nicht geklärt werden, da der Druck einheitlich

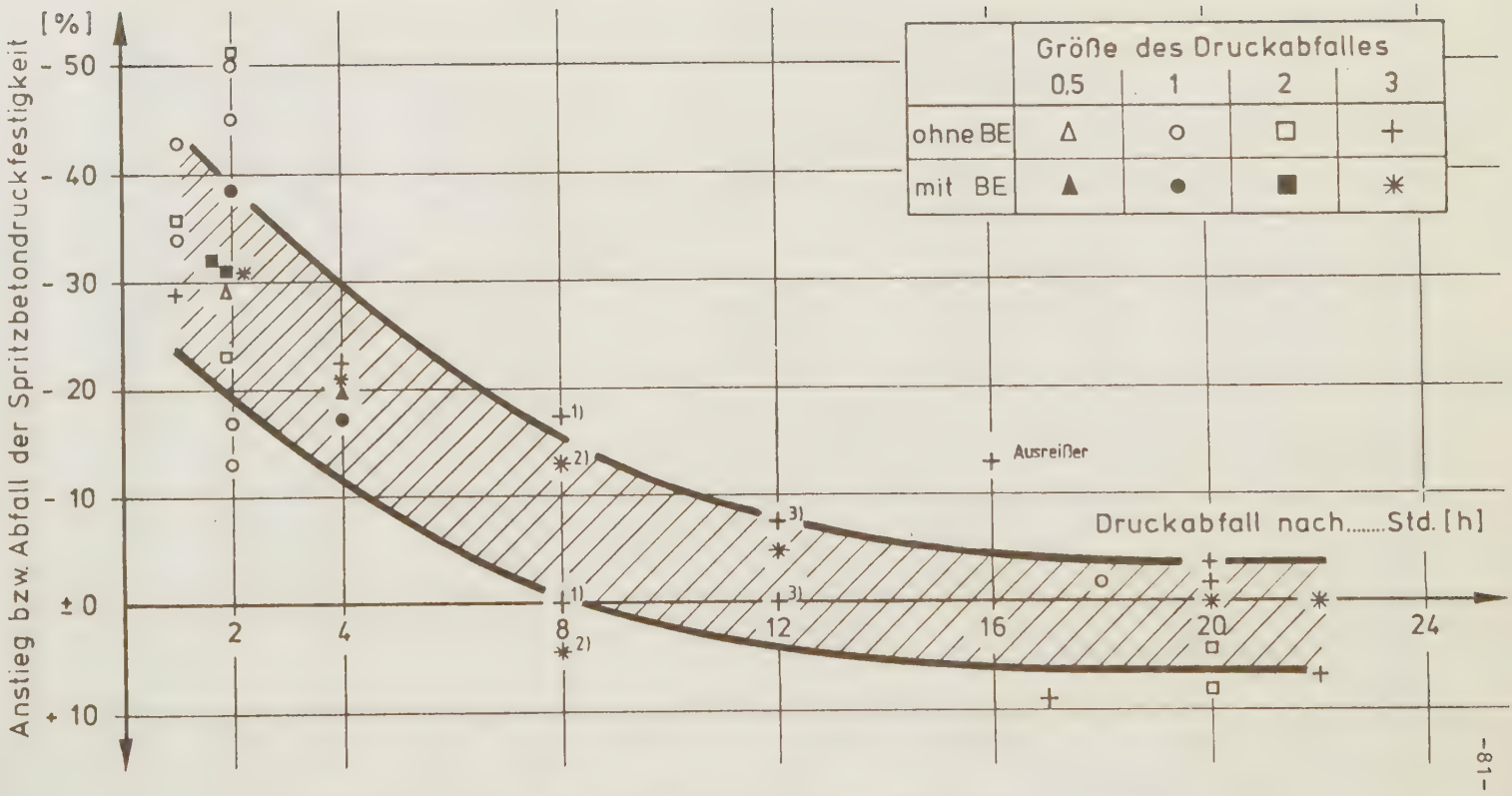
- bei den Druckkammerversuchen mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 bar/h und
- bei den ergänzenden Baustellenversuchen schlagartig

abgesenkt wurde.

(a) Ergebnisse der Druckkammerversuche
Ein Druckabfall im Überdruckbereich (Versuchskammer) in den ersten ca. 16 Stunden nach dem Spritzen führt zu Druckfestigkeitseinbußen des im "Ulmenbereich" (Spritzbetonprobe vertikal) aufgetragenen Spritzbetons (kurz "Druckabfallprobe" genannt). Je kürzer der Zeitabstand zwischen Druckabfall und Spritzbetonherstellung ist, desto größer sind die Festigkeitseinbußen, die bis zu maximal 50 % betragen können. Einige Proben konnten jedoch bereits 8 Stunden nach dem Spritzen ohne eine Verminderung der Druckfestigkeit ausgeschleust werden (s. Bild 2.7/5). Die festgestellten Druckfestigkeitseinbußen konnten bei Druckfestigkeitsprüfungen nach 28 h, 7 d und 28 d festgestellt werden.

(b) Ergebnisse der ergänzenden Baustellenversuche
Die im First gespritzten kleinen Probeplatten mit üblicher BE-Mittel-Zugabe (Abmessungen 50 cm x 50 cm x ca. 10 cm; Probekörperschalungen innenseitig mit Streckmetall ausgelegt) wiesen folgende Erscheinungen bei einem Druckabfall von ca. 1 bar auf (Bild 2.7/6):

(α) Druckabfall ca. 1 Stunde nach dem Spritzen:
Es senkte sich der Spritzbeton im Probekörper, so daß sich Betonteile aus dem Probekörper ablösten, zu Boden fielen und sich außerdem in ca. 2/3 von der Probekörperoberfläche mittig ein etwa 1 cm breiter klaffender Riß bildete, der zum Probekörperrand hin immer kleiner wurde.



1) bis 3) oberer bzw. unterer Wert bei ein und demselben Versuch

Bild 2.7/5: Druckfestigkeitsminderung des Spritzbetons infolge von Druckabfällen in der Druckluftkammer in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Druckabfalles nach dem Spritzen. Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte nach 28 Stunden anhand von Bohrkernen (Größe der Druckabfälle $\geq$ 0,5 bar; Geschwindigkeit des Druckabfalles ca. 2 bar/h)

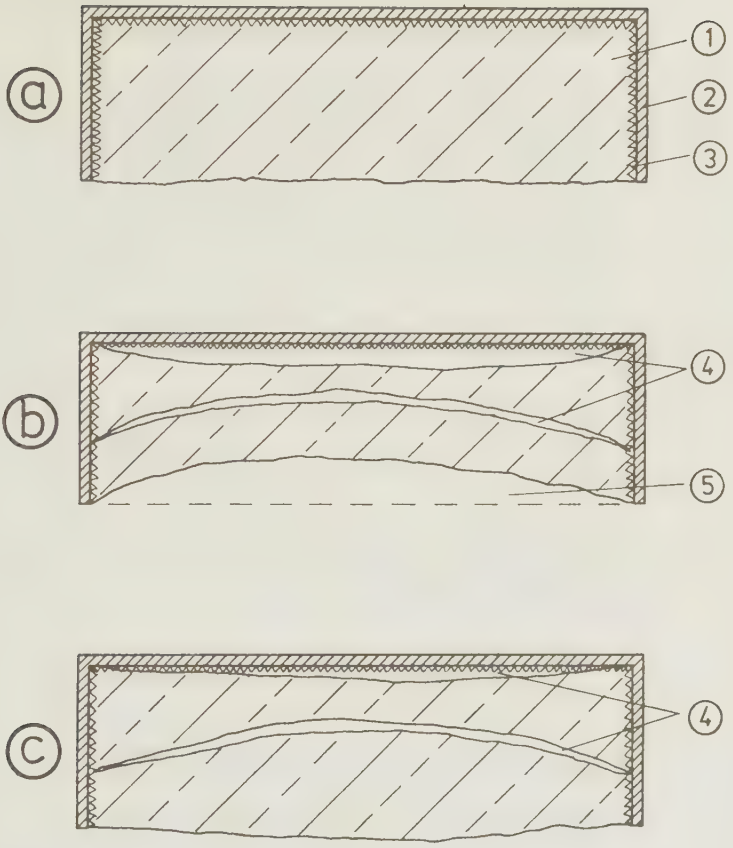


Bild 2.7/6: Querschnittsfläche eines im First gespritzten Spritzbetonprobekörpers (Abmessungen: Länge/Breite/Dicke~50 cm/50 cm/10 cm) vor bzw. nach einem Druckabfall in der Materialschleuse

ⓐ vor einem Druckabfall
ⓑ Druckabfall ca. 1 Std. nach dem Spritzen
ⓒ Druckabfall ca. 4 Std. nach dem Spritzen

(β) Druckabfall ca. 4 Stunden nach dem Spritzen: Hier konnte in den Probekörpern nur der unter (α) beschriebene Riß beobachtet werden.

Die Schäden in den Probekörpern waren in beiden Fällen so groß, daß keine Bohrkerne zur Druckfestigkeitsprüfung entnommen werden konnten. Die im First gespritzten großen Probeplatten (Abmessungen ca. 2 m x 1 m x 0,05 m) mit BE-Mittel-Zugabe (ca. 6 %) fielen bei einem Druckabfall von ca. 1 bar, der etwa 20 Minuten nach dem Spritzen vorgenommen wurde, zu Boden.

Die Sohlplatten mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm x ca. 10 cm konnten bei einem Druckabfall von ca. 1 bar

- mit ca. 4 % BE-Mittel-Zugabe schon 1 Stunde nach dem Spritzen und

- ohne BE-Mittel-Zugabe jedoch erst ca. 8 Stunden nach dem Spritzen

ohne Schädigungen ausgeschleust werden.

Die Sohlplatten ohne BE-Mittel-Zugabe wiesen bei einem Druckabfall ca. 3 Stunden bzw. 4 Stunden nach dem Spritzen eine Verminderung der Druckfestigkeit von ca. 40% bzw. 10% gegenüber den 8 Stunden nach dem Spritzen ausgeschleusten Proben auf (s.Bild 2.7/7).

(6) Um einen Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit herzustellen, wurden die Prüfergebnisse von etwa je 80 Normal- und Überdruckproben aus ca. 25 Versuchen ausgewertet (Bild 2.7/8). Die Werte streuen derart stark, daß keine deutlich ausgeprägte Beziehung zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit hergestellt werden kann. Anders lautende Angaben in der Literatur sollten deshalb mit besonderer Sorgfalt interpretiert werden.

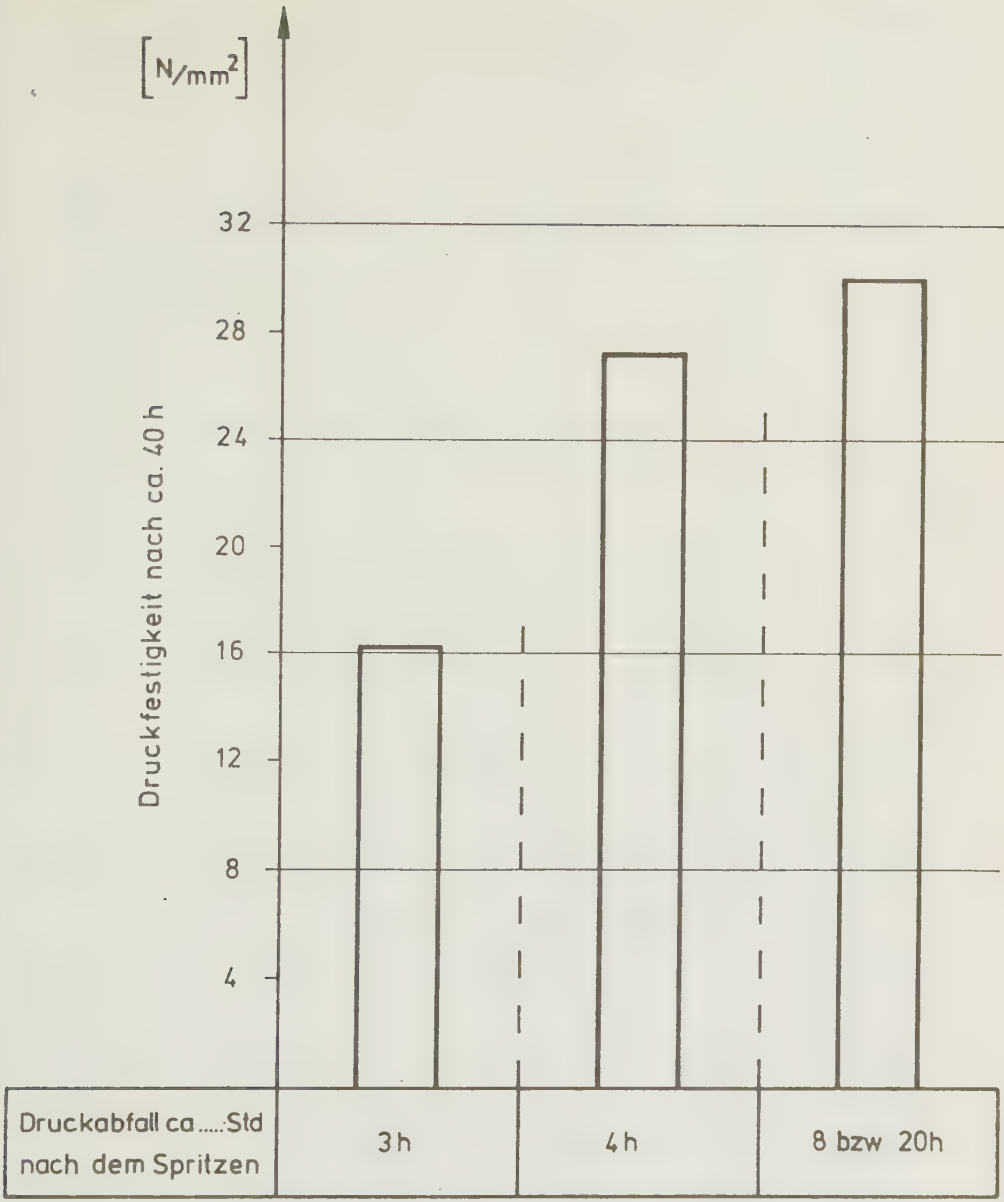


Bild 2.7/7: Spritzbetondruckfestigkeit von Sohlplatten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Druckabfalles nach dem Spritzen. Dem Beton wurde kein BE-Mittel zugegeben. Der Druckabfall betrug ca. 1 bar. Die Druckfestigkeit wurde anhand von Bohrkernen (Ø = 10 cm) ca. 40 Stunden nach Herstellung ermittelt

Bild 2.7/8: Zusammenhang zwischen Spritzbetonrohdichte und Spritzbetondruckfestigkeit

2.7.4 Diskussion der wesentlichen Versuchsergebnisse

2.7.4.1 Die Druckfestigkeit des Spritzbetons in Druckluft in Abhängigkeit von der Größe des Umgebungsluftdruckes (1 - 4 bar absolut)

Die Versuchsergebnisse lassen im Hinblick auf die Druckfestigkeit des in Druckluft hergestellten Spritzbetons keinen Einfluß von der Größe des Umgebungsluftdruckes (bis 4 bar absolut) erkennen. Da der Förderüberdruck (Förderdruck an der Spritzbetonmaschine minus Kammerinnendruck) bei allen Versuchen während der Spritzbetonauftragung konstant gehalten wurde (s. Kapitel 2.4.1) ist der Einfluß der Höhe des jeweiligen Luftdruckes bei der Spritzbetonherstellung weitgehend ausgeschlossen. Es erscheint lediglich eine unterschiedliche Verdichtung durch die Pressung des jeweils herrschenden Luftdruckes denkbar. Der Luftdruck müßte in einem solchen Fall das Korngerüst dichter anlagern und so den Hohlraumgehalt des Betons verringern.
Durch z.B. einen höheren allseitig auf den Spritzbeton gleich wirkenden Luftumgebungsdruck wird die Verdichtung des jungen in Druckluft hergestellten Spritzbetons nicht bessert, da hierzu das erforderliche Druckgefälle fehlt, um überschüssiges Wasser herauszudrücken und Luft in den Luftporen zusammenzudrücken, wie z.B. bei der Herstellung

des Vakuumbetons (s. Bild 2.7/11). Deshalb ergab auch die Überprüfung der Spritzbetonrohdichten keinen Unterschied zwischen Atmosphären- und Druckluftproben. Der allseitig gleichgroße Luftumgebungsdruck von außen und in den Poren hält sich stets selbst das Gleichgewicht, so daß die Höhe des jeweiligen Luftdruckes keinen Einfluß auf die Verdichtung und damit Druckfestigkeit des Spritzbetons haben kann. Es liegen hier also andere Verhältnisse vor als bei Beton, dessen Festigkeit durch zusätzlichen Druck (Auflast) verbessert wird. Walz [11] berichtet über Laborversuche, in denen ca. 20 bar zusätzlicher Druck in den ersten 24 Stunden aufgebracht wird. Dieser Druck kann, da er von außen aufgebracht wird, den Beton entsprechend verdichten.

2.7.4.2 Die Druckfestigkeitserhöhung des Spritzbetons, hervorgerufen durch den Differenzdruck zwischen Spritzbetonoberseite und -unterseite

Wenn bei luftdurchlässigem Spritzuntergrund (Gebirge) ein Differenzdruck zwischen Spritzbetonoberseite und -unterseite entsteht, bildet sich je nach der Dichtigkeit des Spritzbetons ein Luftdruckgefälle im Beton aus, und der Spritzbeton wird von Luft mehr oder weniger durchströmt (s. Kapitel 2.8). Die Versuchsergebnisse zeigen, daß ein Spritzbeton, der einer solchen Belastung ca. 20 Stunden lang ausgesetzt wird, eine höhere Frühdruckfestigkeit aufweist.

Es stellt sich damit die Frage nach dem Zusammenhang der Druckfestigkeit des Spritzbetons und seiner durch Luftdurchströmung bewirkten Veränderung, z. B. durch Austrocknung.

Der Wassergehalt gesättigter Luft ist nach Jakubaschke [12] in weiten Grenzen von der Temperatur und nicht vom Druck abhängig. Maßgebend für die Größe des möglichen Wasserentzuges ist also die Lufttemperatur im Probekörper. Je höher diese Temperatur bei konstanter Luftfeuchte ist, um so mehr Wasser kann die Luft aufnehmen (s. Bild 2.7/9). Die Lufttemperatur wird in der Versuchskammer im wesentlichen beeinflußt durch:

- Die Lufttemperatur im ersten Druckraum der Versuchskammer (s. Bild 2.1/2).

- Die Expansion der Luft bei ihrem Weg vom ersten Druckraum in den zweiten ($P_1 > P_2 \Longrightarrow$ Temperaturabnahme) und

- die Hydratationswärme-Entwicklung im Spritzbetonprobekörper (Temperaturerhöhung)

Unter der Voraussetzung, daß insbesondere durch den Strömungsvorgang ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, kann bei den hier durchgeführten Versuchen eine mittlere Temperatur im Querschnitt des Spritzbetonprobekörpers von ca. 30° C näherungsweise angenommen werden. Der Luftdruck im ersten bzw. zweiten Druckraum der Versuchskammer (s. Bild 2.1/2) beträgt z.B. 2 bar absolut bzw. 1,5 bar absolut. Bei einer Spritzbetondicke von 10 cm und dem hier vorliegenden Differenzdruck durchströmen 1 m² Spritzbeton ca. 1 m³/h atmosphärische Luft (sehr ungünstiger Wert; s. Kapitel 2.8).

Unter der Annahme, daß der Luftdruck im Probekörper ungefähr dem Luftdruck im zweiten Druckraum entspricht (sichere Seite), durchströmen dann 1 m² des 10 cm dicken Spritzbetons ca. 0,66 m³/h Luft bei 1,5 bar absolut. Der Wassergehalt gesättigter Luft bei 30° C beträgt ca. 30 g/m³ Luft (s. Bild 2.7/9). Die relative Luftfeuchte erreichte in der Versuchskammer etwa 90 % (in Drucklufttunneln wird dieser Wert i.a. häufig noch überschritten). Dies bedeutet, daß 1 m³ Luft nur noch 3 g Wasser dem Beton entziehen kann.

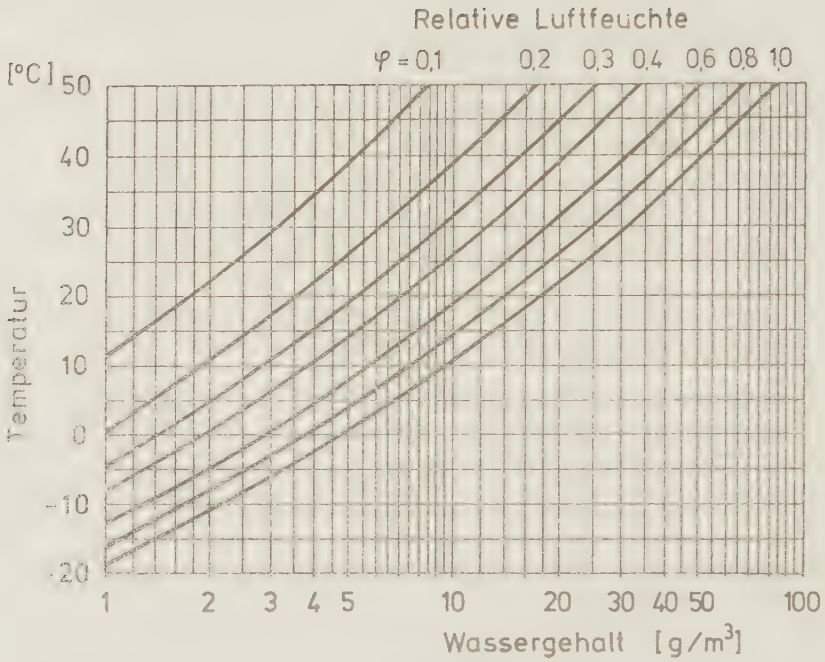


Bild 2.7/9: Wassergehalt der Luft bei verschiedenen Temperaturen und relativen Luftfeuchten nach [23]

Da bei konstanter Temperatur und für die vorliegenden Anwendungsfälle 1 m³ atmosphärische Luft genauso viel Wasser aufnehmen kann wie 1 m³ komprimierte Luft [12], ergibt sich die theoretisch von der komprimierten Luft aufnehmbare Wassermenge zu:

$$3\ g/m^3 \quad . \ 0{,}66\ m^3/h \quad \sim \quad 2\ g/h$$

Die komprimierte Luft kann in diesem Beispiel dem Spritzbeton also maximal 2 g Wasser pro Stunde und m²-Spritzbetonoberfläche entziehen. Bei einer 20stündigen Durchströmung, wie sie bei den Versuchen vorgenommen wurde, werden dem Spritzbeton ca. 0,04 l/m² (Spritzbetondicke 10 cm) Wasser entzogen. Durch diese geringe Abnahme der Wassermenge wird die Druckfestigkeit des Spritzbetons nicht beeinflußt.

Nach DIN 1045, Abschnitt 10.3, [24], ist ein Beton bis zum genügenden Erhärten gegen schädigende Einflüsse z.B. gegen Austrocknen zu schützen. Dafür genügen i.a. sieben Tage. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß der hier vorliegende Beton (s. Kapitel 2.2) erst nach etwa sieben Tagen soweit hydratisiert ist, daß ein späterer Wasserentzug durch z.B. eine Luftströmung seinen Druckfestigkeitsverlauf nicht mehr nennenswert negativ beeinträchtigen kann. Bei einer 7tägigen Luftdurchströmung der Spritzbetonplatte können in obigem Beispiel dem Beton ca. 0,3 l/m² (Spritzbetondicke 10 cm) Wasser entzogen werden. Bei den durchgeführten Betonanalysen (s. Kapitel 2.4.1) wurde bei den üblichen Spritzversuchen an der Auftragungsfläche ein Zementgehalt von ca. 460 kg/m³ (in die Ausgangsmischung wurden nur 340 kg/m³ zugegeben) und ein Wassergehalt von ca. 165 kg/m³ festgestellt. Bei den Probekörperabmessungen von 1 m x 1 m x 0,1 m = 0,1 m³ erhält man einen Zement- bzw. Wassergehalt im Probekörper von ca. 46 kg bzw. 16,5 kg. Damit ergibt sich ein rechnerischer W/Z-Wert für die Spritzbetonprobe ohne Wasserentzug durch eine Luftdurchströmung zu:

$$W/Z \sim 0{,}359$$

und unter Berücksichtigung eines Wasserentzuges durch eine Luftdurchströmung zu:

$$W/Z \sim 0{,}352.$$

Der W/Z-Wert wird also infolge einer 7tägigen Luftdurchströmung auch unter den hier ungünstig angenommenen Voraussetzungen, wie z.B. hohe Luftdurchströmung (s. Kapitel 2.8), hohe Temperatur und für Drucklufttunnel eine in vielen Fällen niedrige relative Luftfeuchte nur geringfügig reduziert. Der Wasserentzug reicht aber auch in diesem Fall nicht aus, um den Spritzbeton in seinem Druckfestigkeitsverlauf negativ zu beeinflussen.

Die ermittelten Wasserverluste des Spritzbetons infolge einer Luftdurchströmung sind im Vergleich zu den Untersuchungen, die sich mit dem Wasserentzug des Betons durch Verdunstung beschäftigen, sehr gering. Nach Wierig [25] wird die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers aus dem frischen Beton vor allem durch die Temperatur (Beton und Umgebung), die relative Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft und durch die Windgeschwindigkeit beeinflußt. Der Wasserentzug des Betons wird bei höherer Luftfeuchte und geringerem Temperaturunterschied zwischen Beton und Luft und einer Abnahme der Windgeschwindigkeit herabgesetzt.

Nischer [26] gibt für 12 cm Betondicke einen Wasserverlust durch Verdunstung von ca. 5 $1/m^2$ in den ersten 18 Stunden nach der Betonherstellung an. Der Wasserverlust nimmt nach 18 Stunden im genannten Beispiel nicht mehr nennenswert weiter zu. Diese Angaben gelten unter folgenden wichtigen Voraussetzungen:

- W/Z-Wert ca. 0,45
- Windgeschwindigkeit 7,5 m/s
- Temperatur 20° C
- relative Luftfeuchte 40 bis 45 %
- verwendeter Zement PZ 275 (H)

Der Wasserverlust durch Austrocknen bei gleichen Betonabmessungen ist nach Nischer [26] um so kleiner, je steifer der Beton, je kleiner der W/Z-Wert und je rascher die Erhärtung des Zementes ist. So war z.B. die Verdunstung bei Verwendung eines PZ 475 anstelle eines PZ 275 (H) nur noch halb so groß.
Der vergleichsweise geringere Wasserentzug des durchströmten Spritzbetons ist im wesentlichen auf die hohe Dichtigkeit des jungen Betons, die niedrige Luftgeschwindigkeit und die hohe relative Luftfeuchte in der Versuchskammer zurückzuführen, die oft Werte um 95 % erreichte, und daher hier eher von einer feuchten Nachbehandlung für den Beton gesprochen werden kann als von einer schädigenden Austrocknungsgefahr. In der Praxis wirken einer Austrocknung des in Druckluft hergestellten Spritzbetons infolge einer Luftdurchströmung folgende Dinge entgegen:

- die hohe relative Luftfeuchte im Drucklufttunnel, die 90 - 95 % und darüber betragen kann

- die normalerweise geringe Luftgeschwindigkeit in Drucklufttunneln

- die schnelle Erstarrung und Erhärtung des Zementes durch die Zugabe eines BE-Mittels

- der üblicherweise niedrige Wasserzementwert bei Spritzbetonen

- die geringen Temperaturunterschiede zwischen Beton und Umgebung durch z.B. das Fehlen einer schädigenden Sonneneinstrahlung, wie sie im Hochbau möglich ist.

Eine schädigende Austrockung des Spritzbetons infolge einer Luftdurchströmung in Drucklufttunneln ist also im Normalfall nicht zu erwarten.

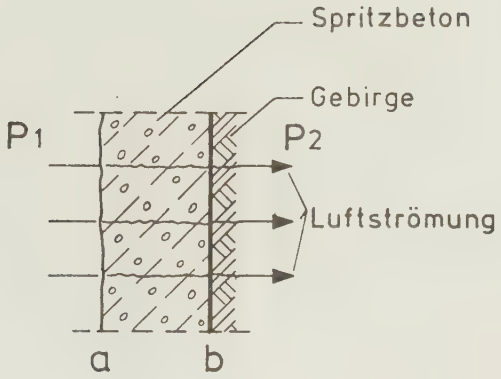
Durch den Differenzdruck zwischen Probekörperoberseite und -unterseite entsteht ein Luftdruckgefälle im Spritzbeton mit dem Maximalwert an der Spritzbetonoberfläche,

dem Minimalwert an der Spritzbetonunterseite und Luftdrücken zwischen diesen Werten in den Luftporen des Spritzbetons je nach ihrer Lage und der Betondichtigkeit (s. Bild 2.7/10). Der Luftüberdruck an der Spritzbetonoberseite entspricht praktisch einer statischen Auflast und drückt insbesondere die der Auftragungsfläche (Gebirge) naheliegenden Spritzbetonschichten stärker zusammen. Hierdurch werden die in diesem Bereich vorhandenen Luftporen verkleinert und das überschüssige Wasser herausgedrückt, ähnlich wie beim Vakuumbeton. Das Prinzip der Vakuumbehandlung ist in Bild 2.7/11 dargestellt. Es wird ein Unterdruck zwischen Vakuumteppich und Betonoberfläche so hergestellt, daß ein Teil des atmosphärischen Luftdruckes den Beton belastet. Diese Auflast von ca. 0,9 bar preßt den Beton zusammen und bewirkt eine dichtere Lagerung des Zementleims und der Zuschläge. Ein Teil des Wassers, das nicht zur Hydratation des Zementes benötigt wird und dadurch zur Erhöhung der Kapillarporen beigetragen hätte, weicht diesem Druck aus und wird abgepumpt (s. Bild 2.7/11).

Die Vakuumbehandlung ist also eine statische Verdichtung bei gleichzeitiger Reduzierung des W/Z-Wertes. Die Dauer der Vakuumbehandlung beträgt nach Zantz [27] ca. 1 - 2 min/cm Betondicke. Die maximale Vakuum-Tiefenwirkung liegt nach Kreitmeyer [28] bei ca. 60 cm. In der Praxis rechnet man jedoch mit etwa nur 20 - 30 cm bei einer noch sinnvollen Behandlungszeit von ca. 20 - 25 Minuten.

Durch Versuche an der TU Hannover konnten mit Hilfe einer Vakuumbehandlung bei 20 cm dicken Platten nach Gerike [30] folgende Betoneigenschaften gegenüber einem unbehandelten Beton verändert werden (Mittelwerte über die Plattendicke):

- Reduzierung des W/Z-Wertes um ca. 10 % von W/Z = 0,697 auf W/Z = 0,612



a) Durchströmte Spritzbetonprobe

b) Vermuteter qualitativer Luftdruckverlauf im Spritzbeton bei einer Belastung infolge eines Differenzdruckes ($P_1 - P_2$)

Bild 2.7/10: Durchströmte Spritzbetonprobe mit zugehörigem Luftdruckverlauf im Beton

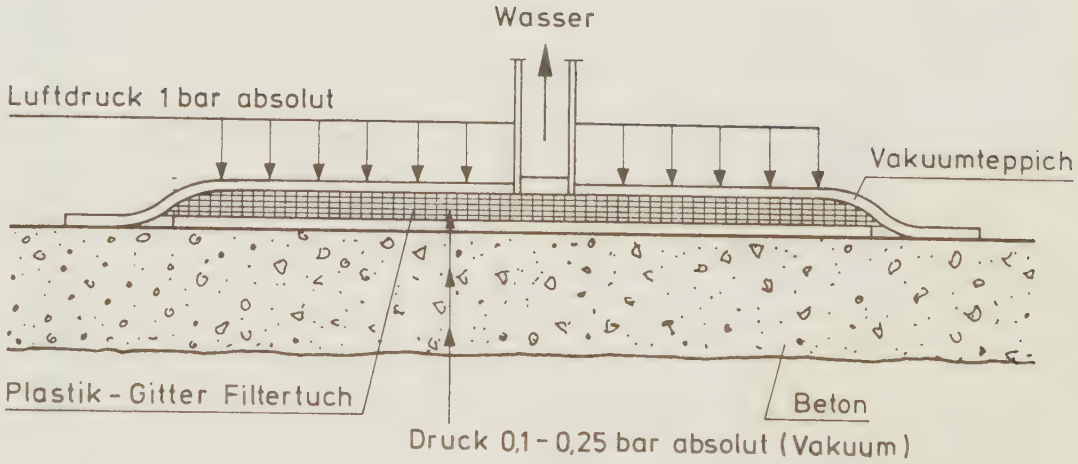


Bild 2.7/11: Prinzip des Vakuum-Verfahrens nach Zantz [27]

- Erhöhung der Rohdichten um ca. 4 %

- Erhöhung der Druckfestigkeit bei einem Betonalter von 1 Tag bzw. 28 Tagen von ca. 50 % bzw. 30 %

Bei den durch einen Differenzdruck ($\Delta p \sim 0{,}5$ bar) belasteten Spritzbetonproben (Plattendicke ca. 10 - 20 cm) wurde eine Erhöhung der Druckfestigkeit im Alter von 1 Tag i.M. etwa nur um 20 % festgestellt, bei gleichzeitiger Anhebung der Rohdichte um ca. 1 % (s. Kapitel 2.7.3). Die Betondruckfestigkeit luftdurchströmter Spritzbetonproben konnte also im Vergleich zu den nicht durchströmten Proben nicht so gut verbessert werden, wie der oben genannte vakuumbehandelte Beton. Dies ist auf folgendes zurückzuführen:

- Der W/Z-Wert der Spritzbetonproben beträgt etwa nur ca. 0,35. Freies Wasser ist deshalb so gut wie gar nicht mehr vorhanden, da bei vollständig hydratisiertem Portlandzement nach Locher/Wischers [31] etwa 35 % $\pm$ 5 % der Zementmasse an Wasser benötigt wird (dies entspricht einem W/Z-Wert von 0,35 $\pm$ 0,05).

- Der eingestellte Luftüberdruck (Differenzdruck) an den Spritzbetonproben ist etwa nur halb so groß wie bei einer Vakuumbehandlung. Die statische Verdichtung ist damit also geringer und wegen des Druckverlaufes in der Probe (s. Bild 2.7/10) im Bereich der Oberfläche Null.

Daraus kann deshalb geschlossen werden, daß der W/Z-Wert durch den Differenzdruck nicht nennenswert reduziert wird, sondern daß vielmehr die Zuschläge sich geringfügig dichter anlagern, und so der Luftporengehalt der belasteten Schichten vermindert und dadurch die Druckfestigkeit erhöht wird.

Die Frühfestigkeit solcher Spritzbetonproben wird wahrscheinlich - ähnlich wie beim Vakuumbeton - stärker verbessert als die Endfestigkeit. Ferner ist die Betonqualität

der unteren (gebirgsseitigen) Spritzbetonschichten besser als die der oberflächennahen.

2.7.4.3 Die Druckfestigkeitsminderungen des Spritzbetons infolge von Druckabfällen

Nach Rehm/Zimbelmann [43] ist die bestimmende Größe des Betons für die Aufnahme äußerer Lasten die Betonzugfestigkeit und zwar unabhängig von der Art der äußeren Belastung. Es kann also davon ausgegangen werden, daß infolge eines Druckabfalles örtlich die innere Betonzugfestigkeit überschritten wird, und dies den jungen Spritzbeton schädigt.
Nach Wischers/Manns [32] weist der Beton in der Übergangsphase vom frischen zum festen Beton einen kritischen Zeitbereich mit sehr kleiner Festigkeit und sehr kleiner Verformbarkeit auf, der wenige Stunden nach dem Herstellen (vorausgesetzt wird ein Beton üblicher Zusammensetzung und ohne BE-Mittel) - frühestens etwa 2 Stunden nach dem Herstellen - beginnt und etwa 4 bis 16 Stunden dauert (s. Bild 2.7/12). Der Beton ist in dieser Übergangsphase gegen Umwelteinflüsse, die Dehnungen hervorrufen, wenig widerstandsfähig. Das Minimum der Bruchdehnung beträgt nach Wierig [33], [34] in dieser Zeit etwa nur 0,05 °/₀₀ (s. Bild 2.7/13). Zugspannungen bzw. Dehnungen im Spritzbeton werden bei einem Druckabfall im Überdruckraum (Tunnel) in erster Linie durch die Expansion der in den Luftporen des Spritzbetons eingeschlossenen unter Überdruck stehenden Luft hervorgerufen. Nach Weigler/Karl [35] liegen über die Zugfestigkeit von jungem Beton nur wenig Angaben vor, da ihre Ermittlung versuchstechnische Schwierigkeiten bei der Lasteinleitung bereitet. Bei Beton üblicher Zusammensetzung ist nach 3 Stunden noch keine nennenswerte Zugfestigkeit vorhanden. Dann wächst sie bis zum Alter von etwa 24 Stunden sehr schnell an und erreicht dabei etwa 10 % der zugehörigen Druckfestigkeit [35]. Wesche [42] gibt für die Zugfestigkeit des Betons etwa 4 % bis 10 % seiner Druckfestigkeit an. Die jeweilige Festigkeit des jungen Spritzbetons streut relativ stark wie eige Frühfestigkeitsprüfungen mit Hilfe des Kaindl-Meyco-

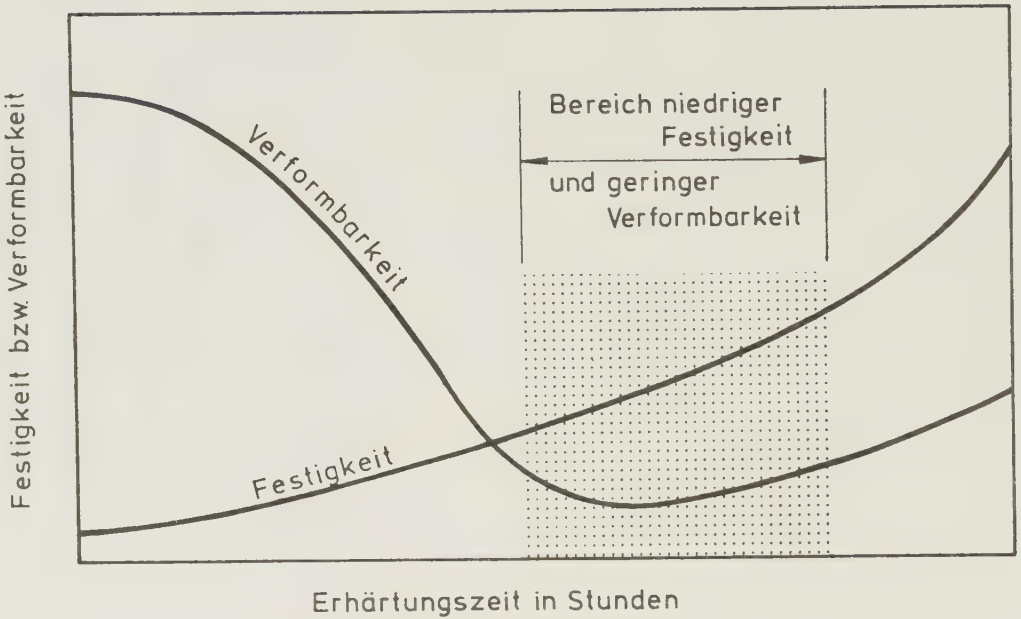


Bild 2.7/12: Entwicklung der Festigkeit und Verformbarkeit von jungem Beton (schematische Darstellung) nach Wischers/ Manns [49]

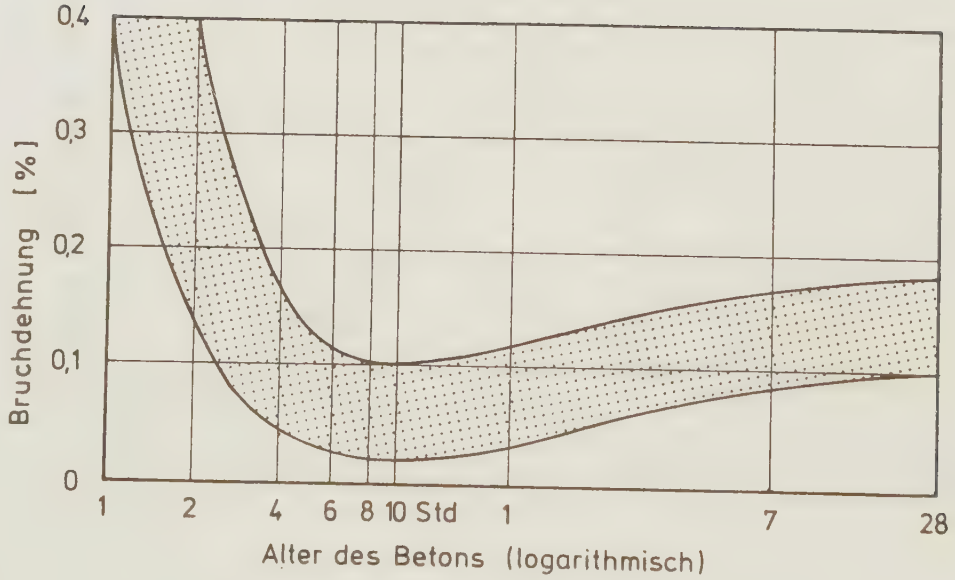


Bild 2.7/13: Bruchdehnung von Beton bei Zugbeanspruchung in Abhängigkeit vom Alter (entnommen: Wischers/Manns [49])

Gerätes [36] gezeigt haben. Dies muß bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse beachtet werden.

Im folgenden wird versucht, theoretisch die Beanspruchung des Spritzbetons bei Druckabfällen zu erfassen, und eine Aussage darüber zu machen, wie groß die Festigkeit des Spritzbetons sein muß, damit er ohne Schädigungen einen Druckabfall ertragen kann.

Während des Spritzvorganges werden Luftporen im Spritzbeton eingeschlossen. Wie die Versuche der Kapitel 2.4.1 und 2.6 zeigen, gilt für den aufgetragenen Spritzbeton:

- Zementgehalt am Prüffeld ca. 460 kg/m³
- Zuschlagmenge (trocken) ca. 1800 kg/m³
- Wassergehalt ca. 165 kg/m³

Das Volumen des Frischbetons setzt sich wie folgt nach Wesche [42] zusammen:

$$V_b = V_Z + V_K + V_W + V_L$$

$$V_b = \frac{Z}{\varrho_Z} + \frac{K}{\varrho_K} + \frac{W}{\varrho_W} + V_L$$

mit V_Z = Volumen des Portlandzementes

ϱ_Z = Reindichte des Zementes; ϱ_Z = 3,1 kg/dm³

Z = Zementgewicht pro m³

V_K = Volumen des Zuschlages (Rheinkies)

ϱ_K = Rohdichte des Zuschlags; ϱ_K = 2,6 kg/dm³

K = Gewicht des Zuschlages pro m³

V_W = Volumen des Wassers

ϱ_W = Dichte des Wassers; ϱ_W = 1,0 kg/dm³

W = Wassergehalt pro m³

V_L = Volumen der Luftporen

Bei angenommener vollkommener Verdichtung gilt $V_L \equiv 0$ und

$$V_B = \frac{460}{3100} + \frac{1800}{2600} + \frac{165}{1000}$$

$$V_B = 0{,}148 + 0{,}692 + 0{,}165 \sim 1{,}0 \text{ m}^3$$

Für die Masse m_b der Zugabekomponenten gilt:

$$m_b = 460 + 1800 + 165 = 2425 \text{ kg/m}^3$$

Man erhält für die Frischbetonrohdichte ϱ_{fv} bei vollkommener Verdichtung damit:

$$\varrho_{fv} = \frac{m_b}{V_b} = 2425 \text{ kg/m}^3$$

Die tatsächliche Frischbetonrohdichte ϱ_f der Überdruck- und Normalproben lag zwischen ca. 2,3 kg/dm³ und ca. 2,4 kg/dm³. Für den Luftporengehalt P_{bf} gilt:

$$P_{bf} = \frac{\varrho_{fv} - \varrho_f}{\varrho_{fv}} \cdot 100 \quad [\text{Vol.-\%}]$$

$$\min P_{bf} = \frac{2425 - 2400}{2425} \cdot 100 \sim 1 \text{ \%}$$

$$\max P_{bf} = \frac{2425 - 2300}{2425} \cdot 100 \sim 5 \text{ \%}$$

Der Luftporengehalt im Spritzbeton liegt also zwischen 1 % bis 5 %.
Bei einem mittleren Luftporengehalt von ca. 3 % bedeutet dies, daß in einem Probekörper mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm x 10 cm immerhin 750 cm³ Luftporen vorhanden sind, in denen sich Luft unter dem zu diesem Zeitpunkt herrschenden Umgebungsluftdruck be-

findet. Wenn nun der Umgebungsluftdruck abgesenkt wird (Druckabfall im Überdruckraum) so kann u.U. der nun vorhandene Luftüberdruck in den Luftporen das Gefüge des jungen Spritzbetons zerstören, da sich die in den Luftporen befindliche komprimierte Luft auf den nun niedrigeren Umgebungsluftdruck entspannen möchte. Dabei wird der Spritzbeton auf Zug beansprucht (s. Bild 2.7/14).

Der große Einfluß des Luftporenabstandes und der Luftporen wird deutlich, wenn man sie auf das Zementsteinvolumen bezieht. Da bei der vorliegenden Spritzbetonzusammensetzung der Zementleim etwa 30 % des Betonvolumens einnimmt, entsprechen 3 % Luftporen im Beton fast 10 % Zementsteinporen. Wenn man sich einen Zementsteinwürfel mit der Kantenlänge 10 mm denkt, so erhält man bei 10 % Zementsteinporen 100 mm³ Luft, die in den Luftporen eingeschlossen ist. Geht man ferner von einer gleichmäßigen räumlichen Verteilung kugelförmiger Luftporen aus, die alle z.B. einen Durchmesser von 0,5 mm haben [60] , so erhält man einen Zementsteinsteg zwischen zwei Poren mit einer minimalen Breite von unter 0,5 mm.
Damit erhält man eine erforderliche Mindestzugspannung im Zementstein infolge eines Poreninnendruckes von $P = 0{,}3\ N/mm^2$ ($\hat{=}$ 3 bar) zu (s. Bild 2.7/14).

$$\beta_z = \frac{P \cdot d_2^2}{(d_1^2 - d_2^2)}$$

mit $d_1 = 1$ mm und $d_2 = 0{,}5$ mm

$$\beta_z = 0{,}1\ N/mm^2$$

Alexanderson [37] hat in 15 cm-Betonwürfeln mit Hilfe eines Ballons eine Großpore ausgebildet, in der mit Druckluft ein Überdruck erzeugt wurde. Bei gleichzeitiger Messung der Betonzugfestigkeit wurde der Berstdruck der Großpore ermittelt. Alexanderson kommt zu geringeren Mindestzugfestigkeiten, als die

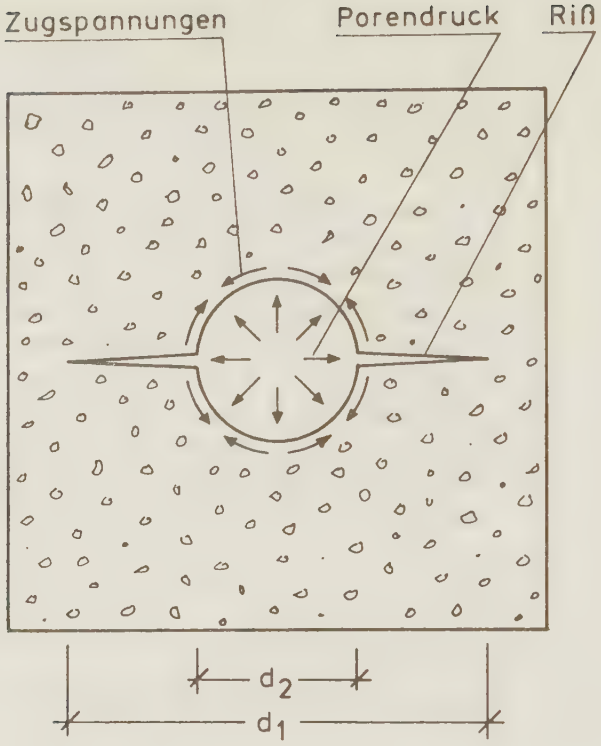


Bild 2.7/14: Beanspruchung des Spritzbetons durch die in den Luftporen eingeschlossene, komprimierte Luft nach einem Druckabfall

oben überschlägig berechneten, da er insbesondere den ungünstigen Einfluß benachbarter Poren nicht berücksichtigt. Ferner kann bereits vor dem Bersten der Beton durch z.B. eine allgemeine Auflockerung des Gefüges infolge einer geringfügigen Dehnung der einzelnen Luftporen in seiner Festigkeit geschädigt werden.

Weigler/Karl [35] geben die Zugfestigkeit des Betons im Alter von 4 Stunden für Beton mit niedrigem W/Z-Wert (W/Z = 0,4) und bei Verwendung eines führhochfesten Zementes nur mit ca. 0,01 N/mm² an. Je nach Betonzusammensetzung kann dann aber nach 6 bis 8 Stunden bereits mit einer Zugfestigkeit von etwa 0,1 N/mm² gerechnet werden [35]. Erst in diesem Alter entspricht also die vorhandene Betonzugfestigkeit etwa der überschlägig berechneten Zugbeanspruchung durch einen Poreninnendruck von 3 bar. Die Expansion der eingeschlossenen Luft in den Luftporen kann also bis zu einem Betonalter von ca. 8 Stunden die wesentliche Ursache für die Schädigung des Spritzbetons infolge eines Druckabfalles sein.
Die Versuchsergebnisse bestätigen diese Überlegungen, da Sohlplatten ohne BE-Mittel-Zugabe erst ca. 8 Stunden nach dem Spritzen ohne Schädigungen ausgeschleust werden konnten (s. Bild 2.7/7). Außerdem sind die in der Versuchskammer hergestellten Spritzbetonproben bei einem Druckabfall von 3 bar etwa 8 Stunden nach dem Spritzen erstmals teilweise ohne Schäden (s. Bild 2.7/5). Der Unterschied in der Frühfestigkeitsentwicklung des ohne bzw. mit BE-Mittel hergestellten Spritzbetons in den ersten 8 Stunden ist gering (s. Bild 2.7/15). Deshalb haben sich in diesem Zeitbereich auch etwa gleiche Schäden am Spritzbeton infolge eines Druckabfalles ergeben. Bei einer schnelleren Frühfestigkeitsentwicklung durch ein rascher wirkendes BE-Mittel (z. B. nach Bild 2.7/4) verkürzt sich der gefährliche Zeitbereich entsprechend. So konnte z. B. bei den Baustellenversuchen eine Sohlplatte mit BE-Mittel bereits im Alter von 1 Stunde ohne Schäden ausgeschleust werden (Druckabfall ca. 1 bar

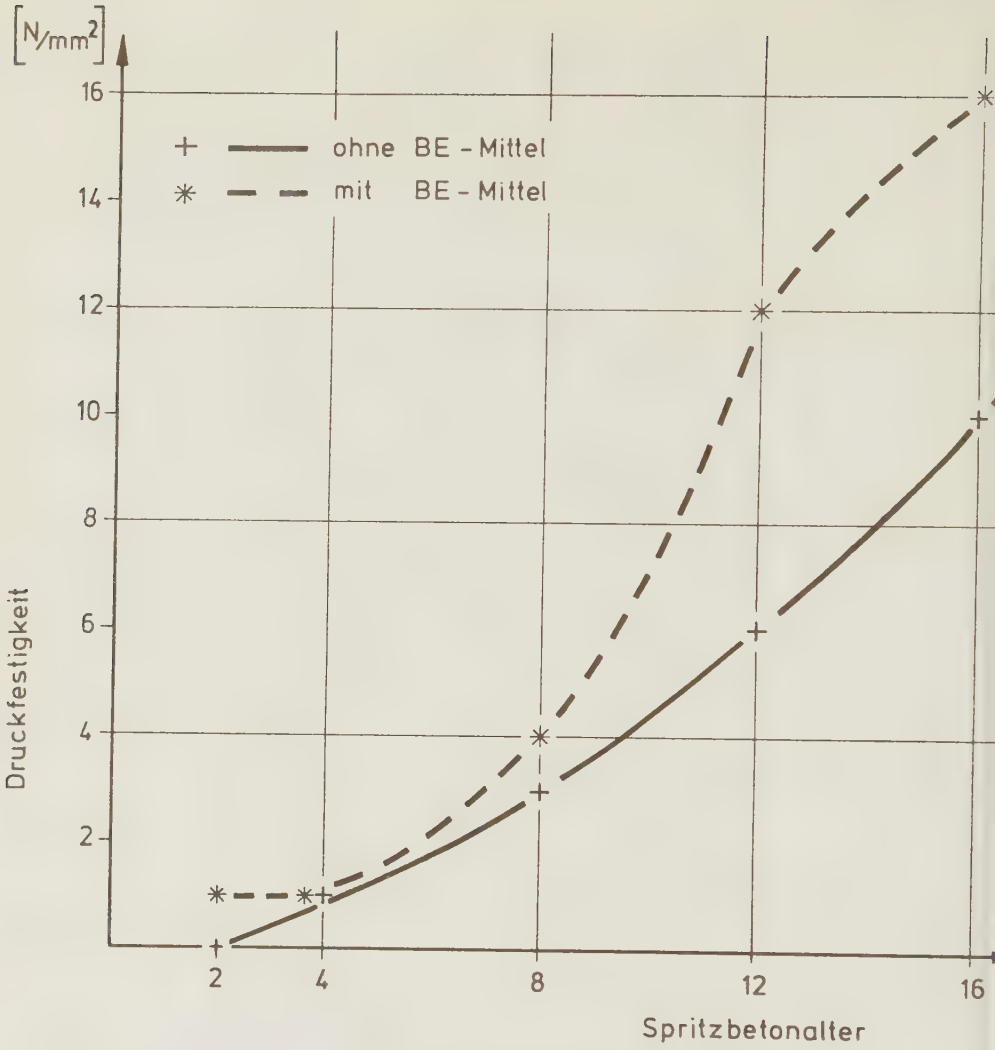


Bild 2.7/15: Beispiel für den mittleren Druckfestigkeitsverlauf des auf dem Atmosphärenprüfstand bei den praxisnahen Laborversuchen hergestellten Spritzbetons (Ausgangsmischung s. Kapitel 2.2) ohne bzw. mit BE-Mittel (Addiment, Zugabemenge 4 % des Zementgewichtes). Die Druckfestigkeit wurde mit Hilfe des Kaindl-Meyco-Gerätes [36] bestimmt. Die Druckfestigkeit nicht luftdurchströmter Spritzbetonproben verläuft in Druckluft ohne die Einwirkung störender Einflüsse (wie z. B. Druckabfälle) etwa gleich.

Bild 2.7/5 zeigt, daß auch ein Druckabfall über 8 Stunden hinaus bis zu etwa 16 Stunden nach dem Spritzen u.U. noch Schäden verursachen kann. Die Verminderung der Spritzbetondruckfestigkeit in diesem Zeitbereich (Unsicherheitsbereich) liegt aber in der Mehrzahl bereits unter 10 %. Die Ursache hierfür kann evtl. in einem Wegfall der Stützwirkung durch die Druckluft bei einem Druckabfall, einem höheren Luftporengehalt des Betons und insbesondere in der starken Streuung der Spritzbetonzugfestigkeit im jungen Alter gesehen werden. Der Zeitbereich in dem Schäden durch einen Druckabfall aufgetreten sind,stimmt gut mit dem von Wischers/Manns [32] angegebenen kritischen Zeitbereich bis zu 16 Stunden überein (s. Bilder 2.7/12 und 2.7/13).
Spritzbeton im Firstbereich wird bei einem Druckabfall zusätzlich zur expandierenden Luft in den Luftporen noch durch die ungünstige Wirkung des Spritzbetoneigengewichtes belastet. Die inneren Zugspannungen sind hierdurch größer als bei Sohlplatten, bei denen das Eigengewicht nur Druckspannungen erzeugt. Das vor dem Druckabfall im Gleichgewicht befindliche System Druckluft/Spritzbeton wird durch die Absenkung des Druckes gestört, und es kommt zum Absacken bzw. Herabfallen des Spritzbetons. Dies zeigten eindrucksvoll die bei den Baustellenversuchen gespritzten großen Firstplatten, die bei einem Druckabfall von ca. 1 bar etwa 20 Minuten nach dem Spritzen herabfielen. Bei den kleinen Spritzbetonplatten (Abmessungen ca. 50 cm x 50 cm x 10 cm) konnte sich der Spritzbeton am Streckmetall durch eine Art Gewölbebildung abstützen (s. Bild 2.7/6), so daß bei einem Druckabfall von ca. 1 bar etwa 1 Stunde nach dem Spritzen nur ein Teil herabfiel und ein klaffender Riß im Spritzbeton entstand. Ohne Streckmetallauslegung der Schalung wären diese Proben ganz zu Boden gefallen.

Um das Spritzbetoneigengewicht zu tragen, muß die ge-

birgsseitig am nächsten liegende Betonfuge eine Mindestzugspannung pro mm Auftragsstärke von etwa $23{,}5 \cdot 10^{-6}$ N/mm² aufnehmen. Bei einer 10 cm dicken Platte also $2{,}35 \cdot 10^{-3}$ N/mm². Der Einfluß des Eigengewichtes bei der Auftragung üblicher Spritzbetondicken ist also verhältnismäßig klein, so daß die ungünstige Wirkung des Eigengewichtes in Verbindung mit der Expansion der komprimierten Luft nur die Schadensart (z.B. Risse; Herabfallen des Spritzbetons) verändert, nicht aber nennenswert den kritischen Zeitbereich vergrößert.

Die zu erwartenden Schäden am Spritzbeton infolge expandierender Luft in den Poren bei einem Druckabfall werden geringer mit:

- wachsender Betonzugfestigkeit
  Die jeweilige Betonzugfestigkeit hängt beim Spritzbeton in erster Linie vom verwendeten BE-Mittel und vom Alter des Betons ab

- einem geringeren Luftporengehalt und Poreninnendruck.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß bei einer Druckfestigkeit von ca. 10 N/mm² (s. Bild 2.7/15) der Spritzbeton ohne nennenswerte Schäden einen Druckabfall von 3 bar überstehen kann (s. Bild 2.7/5).

2.8 Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons

2.8.1 Allgemeines

Für die Herstellung eines gegen Druckluft undurchlässigen Betons gelten nach Walz [38] ähnliche Gesichtspunkte wie für die Herstellung wasserundurchlässigen Betons. Jedoch ist nach Graf/Albrecht/Schäffer [39] zu beachten, daß die Luftdurchlässigkeit des Betons größer ist als die Wasserdurchlässigkeit. Angaben über die Zusammensetzung und Herstellung von wasserundurchlässigem Beton werden beispielsweise in [40] gemacht.

Bei entsprechender Betonzusammensetzung und sonst gleichen Ausgangsbedingungen nimmt die Luftdurchlässigkeit von Betonproben ab, mit:

- größerer Betondicke,
- zunehmendem Betonalter (wenn ausreichend Wasser zur Hydratation zur Verfügung steht),
- abnehmendem Belastungsluftdruck,
- kleiner werdender Luftdruck - Einwirkungszeit,
- guter Nachbehandlung und
- geringerem Feuchtigkeitsgehalt des Betons.

In der Literatur finden sich Angaben über die Größe der Betonluftdurchlässigkeit je nach seiner Zusammensetzung, der Größe des Belastungsdruckes usw. von luftdicht bis stark luftdurchlässig (s. Tabelle 2.8/1).

Sieblinie des Zuschlaggemisches nach DIN 1045	Zementgehalt kg/m³	Luftdurchgang in l je h und m² unter p =		
		0,5 bar	1 bar	2 bar
D	240	0,23	3,6	15
	300	0	0	0
F	240	765	1945	4551
	300	94	217	525

Tabelle 2.8/1: Luftdurchlässigkeit von 12 cm dicken Betonplatten nach Versuchen des Otto-Graf-Institutes in Abhängigkeit von der Sieblinie, vom Zementgehalt und dem aufgebrachten Luftdruck p. Die Platten wurden bis zur Prüfung zunächst 7 Tage feucht, dann 7 Tage trocken gelagert.
Der Beton wurde mit einem Ausbreitmaß nach DIN 1048 von 35 cm angemacht.

Anmerkung: Die höhere Luftdurchlässigkeit des Betons aus dem Zuschlaggemisch der Sieblinie F ist auf den höheren Wasseranspruch des Korngemisches zurückzuführen, der bei konstantem Zementgehalt (240 kg/m³ bzw. 300 kg/m³) eine Erhöhung des W/Z-Wertes und damit eine Vergrößerung des Porensystems zur Folge hat.

Nach Versuchen von Walz [38] ist ein nicht scharf ausgetrockneter Beton gegen Druckluft von 5 bar praktisch undurchlässig, wenn sein Wasserzementwert 0,65 nicht überschreitet, sein Zementgehalt wenigstens 300 kg (besser 350 kg) je m³ fertigen Betons beträgt, und der Beton vollständig verdichtet und sorgfältig nachbehandelt worden ist. Diese Angaben beziehen sich dabei auf Beton im Alter von ca. 14 Tagen. Wenn Spritzbeton in Druckluft auf luftdurchlässigem Gebirge insbesondere im Firstbereich aufgetragen wird, so durchströmt den Beton je nach seiner Dichtigkeit mehr oder weniger stark Luft bereits im jüngsten Alter. Nischer [26] stellte bei Versuchen eine Abnahme der Wasserdurchlässigkeit von jungem Beton in den ersten 14 Stunden um zwei 10er-Potenzen fest. Geht man aufgrund der Porenausbildung (z. B. Kapillarporen) von einer Analogie zwischen den Gegebenheiten der Wasserdurchlässigkeit und der Luftdurchlässigkeit aus, so zeigt dies deutlich, daß die Luftdurchlässigkeitsangaben aus der Literatur, die sich stets auf älteren Beton beziehen, nicht einfach auf jungen Spritzbeton übertragbar sind. Außerdem kann nach Wesche [42] u. U. durch das bei Spritzbetonarbeiten üblicherweise zugegebene BE-Mittel die Dichtigkeit des Betons negativ beeinflußt werden.

2.8.2 Messung der Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons

Die Prüfung erfolgte an Spritzbetonbohrkernen mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 5 cm. Die Oberfläche der Bohrkerne wurde mit Polyesterharz eingestrichen, bis auf zwei mittig angeordneten Kreisflächen auf beiden Zylinderstirnseiten mit einem Durchmesser von ca. 10 cm. Die Polyesterharzschicht sollte sicherstellen, daß die Druckluft durch die gesamte Spritzbetonstärke strömt und nicht auf kürzerem Weg z.B. bereits an der Mantelfläche austritt.
Der Prüfling wurde in eine Spannvorrichtung, wie sie auch bei Wasserundurchlässigkeitsprüfungen verwendet wird, gesetzt, und auf der einen Seite mit Druckluft beaufschlagt. Auf der anderen Seite wurde die ausströmende Luftmenge gemessen.
Die Spritzbetonausgangsmischung bestand aus:

- Zement: 370 kg/m³

- Zuschlag: Sieblinie B_8
- Zusatzstoff: 50 kg/m³ Füller

Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Spritzbetonproben im Alter von 28 Tagen bei Luftlagerung waren bei einem Belastungsluftdruck von 5 bar luftdicht (Einwirkdauer ca. 24 Stunden). Dies gilt für Spritzbetonproben ohne bzw. mit BE-Mittel (Guttacret; Zugabemenge ca. 4 % des Zementgewichtes)

- Die jungen Spritzbetonproben (ohne BE-Mittel-Zugabe) im Alter von ca. 30 Stunden waren luftdurchlässig. Die Luftdurchlässigkeit nahm mit steigendem Belastungsluftdruck zu (s. Bild 2.8/1).

Die Luftdurchlässigkeit eines sachgemäß hergestellten Spritzbetons ohne Fehlstellen und Risse bei den anstehenden Druckverhältnissen im innerstädtischen Verkehrstunnelbau ist damit vernachlässigbar gering gegenüber den Luftverlusten an Fehlstellen und im Bereich unversiegelter Gebirgszonen. In Kapitel 2.7.4.2 wurde der Nachweis geführt, daß durch die Luftströmung die Spritzbetondruckfestigkeit im Drucklufttunnel nicht negativ beeinflußt wird. Bei der Berechnung wurde als Luftdurchsatz ein extrem ungünstiger Wert von 1000 l/h + m² angesetzt. Hierdurch sollte der größeren Luftdurchlässigkeit von sehr jungem Beton Rechnung getragen werden und auch etwas schlechter zusammengesetzten Spritzbetonbereichen (vgl. Tabelle 2.8/1).

2.8.3 Theoretische Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons

Die Grundlage für die quantitative Beschreibung eines Strömungsvorganges in porösen Medien bildet ein Gesetz, das von Darcy bei der Untersuchung von Flüssigkeitsströmungen aufgestellt und später auf die Strömung von Gasen ausgedehnt wurde [44].

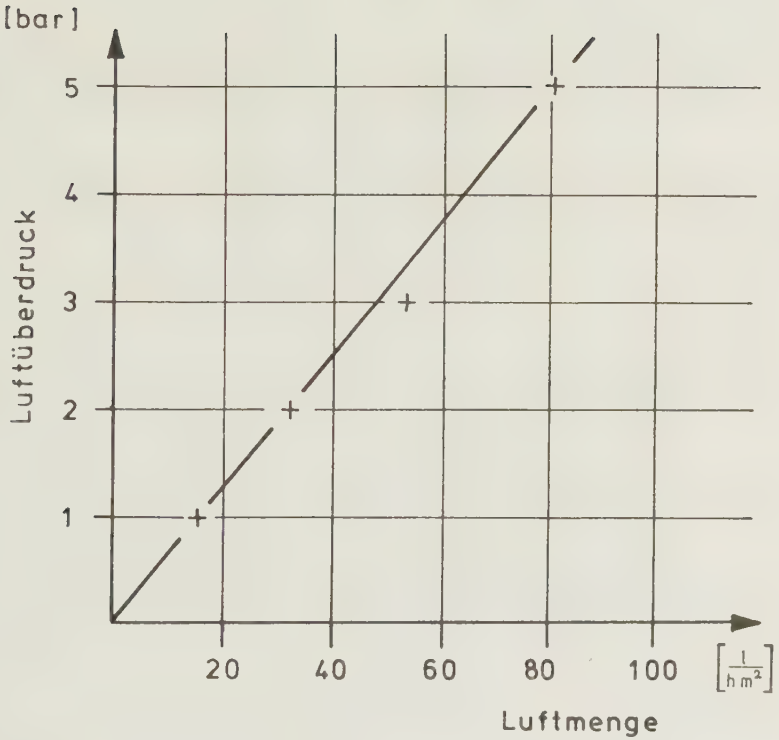


Bild 2.8/1: Luftdurchlässigkeit von 5 cm dicken Spritzbetonproben im Alter von ca. 30 Stunden in Abhängigkeit vom Luftüberdruck P_1 an der Probenoberseite. Der Luftdruck an der Probenunterseite betrug P_2 = 1 bar absolut

Nach Engelhardt [45] liegen i.a. Gasströmungen in Gesteinen im Gültigkeitsbereich der Darcy-Gleichung, wenn gilt:

$$R_e = \frac{\varrho \cdot v \cdot d}{\eta} \leq 1$$

mit

R_e = Reynoldszahl [-]

ϱ = Dichte des Gases [kg/m³]

v = mittlere Gasgeschwindigkeit [m/s]

d = mittlerer Korndurchmesser [m]

η = dynamische Viskosität $\left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]$

Bei der Berechnung der Reynoldszahl ist nach Terschüren [46] zu beachten, daß nicht die Geschwindigkeit in den Poren herangezogen werden kann, da diese nicht meßbar ist, sondern die makroskopische Geschwindigkeit des Gases durch die gesamte Probe.
Die nachfolgenden Angaben beziehen sich alle auf die Luftdurchlässigkeit des untersuchten Spritzbetons im Alter von ca. 30 Stunden. Der Nachweis für den Gültigkeitsbereich der Darcy-Strömung wird geführt mit:

ϱ = 1,23 kg/m³, Luftdichte

d = 0,0015 m, mittlerer Korndurchmesser der Sieblinie B_8

η = $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ $\left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]$

Die mittlere Gasgeschwindigkeit v läßt sich aus max Q = 81,2 l/h/m² (s. Bild 2.8/1) bestimmen zu:

$$v = \frac{81{,}2 \cdot 10^{-3}}{3600} \approx 2{,}3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Für die Reynoldszahl R_e gilt mit obigen Angaben:

$$R_e = \frac{1{,}23 \cdot 2{,}3 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}0015}{1{,}8 \cdot 10^{-5}}$$

$$R_e \sim 2{,}4 \cdot 10^{-3} < 1$$

Es liegt damit eine Darcy-Strömung vor. Betrachtet man einen zylindrischen Gesteinskörper der Länge l, durch den das Gas strömt, und an dessen Eintritts- und Austrittsquerschnitt die Drücke p_1 bzw. p_2 herrschen sollen, so erhält man nach der Klinkenberg-Gleichung [47] unter Berücksichtigung von viskoser Strömung und Gleitströmung:

$$B_o' = \frac{2\eta \cdot l \cdot Q \cdot p_2}{F\,(p_1 + p_2)\,(p_1 - p_2)} \qquad (1)$$

mit

B_o' = scheinbare Gasdurchlässigkeit [m²] (keine Konstante)

η = dynamische Viskosität $\left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]$

l = Probendicke [m]

Q = Gasmenge unter dem Druck p_2, die die Probe durchströmt [m³/s]

p_1 bzw. p_2 = Luftdruck auf der Probenoberseite bzw. -unterseite $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

F = Querschnittfläche der Probe [m²]

Die scheinbare Gasdurchlässigkeit B_o' läßt sich mit Hilfe der Versuchsergebnisse nach Gleichung (1) bestimmen (s. Tabelle 2.8/2) und setzt sich nach Klinkenberg wie folgt zusammen:

$$B_o' = B_o + \gamma \cdot \eta \frac{2}{(p_1 + p_2)} \sqrt{\frac{T}{M}} \qquad (2)$$

mit

B_o = viskoser Gasdurchlässigkeitskoeffizient [m²];

γ = Gleitkonstante [m]

T = absolute Temperatur [K]

M = Molekulargewicht der Luft $\frac{Kg}{Kmol}$

p_1, p_2 und η siehe Angaben zur Gleichung (1)

Anmerkung: Bei Dimensionsbetrachtungen ist zu beachten, daß die allgemeine Gaskonstante R in J/(Kmol . K) zahlenmäßig in γ enthalten ist, dimensionsmäßig jedoch in den Wurzelausdruck gehört.

Klinkenberg fand bei Auftreten von Gleitströmung lineare Abhängigkeit vom reziproken mittleren Druck $\bar{p} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$. Die scheinbare Gasdurchlässigkeit B'_o verringert sich nach Gleichung (2) mit steigendem Luftdruck, bis schließlich nur noch die viskose Gasdurchlässigkeit B_o die Strömung bestimmt.
Aus Bild 2.8/2 kann durch Bestimmung des Anstieges der Geraden der Gleitanteil der Strömung bestimmt werden. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate gibt die viskose Gasdurchlässigkeit B_o an. Für den Anstieg der Geraden gilt:

$$\frac{\Delta B'_o}{\Delta \frac{1}{\bar{p}}} = \frac{(25{,}1 - 17{,}6) \cdot 10^{-18}}{(0{,}67 - 0{,}4) \cdot 10^{-5}} = 27{,}78 \cdot 10^{-13} \text{ [N]}$$

Ferner gilt:

$$\gamma \cdot \eta \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 27{,}78 \cdot 10^{-13} \text{ [N]}$$

Nun läßt sich die Gleitkonstante bestimmen zu:

$$\gamma = \frac{27{,}78 \cdot 10^{-13}}{1{,}8 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{273 + 20}{29}}}$$

$$\gamma = 4{,}86 \cdot 10^{-8} \text{ [m]}$$

Aus Tabelle 2.8/2 ist deutlich erkennbar, daß der Gleitströmungsanteil nicht vernachlässigt werden kann,

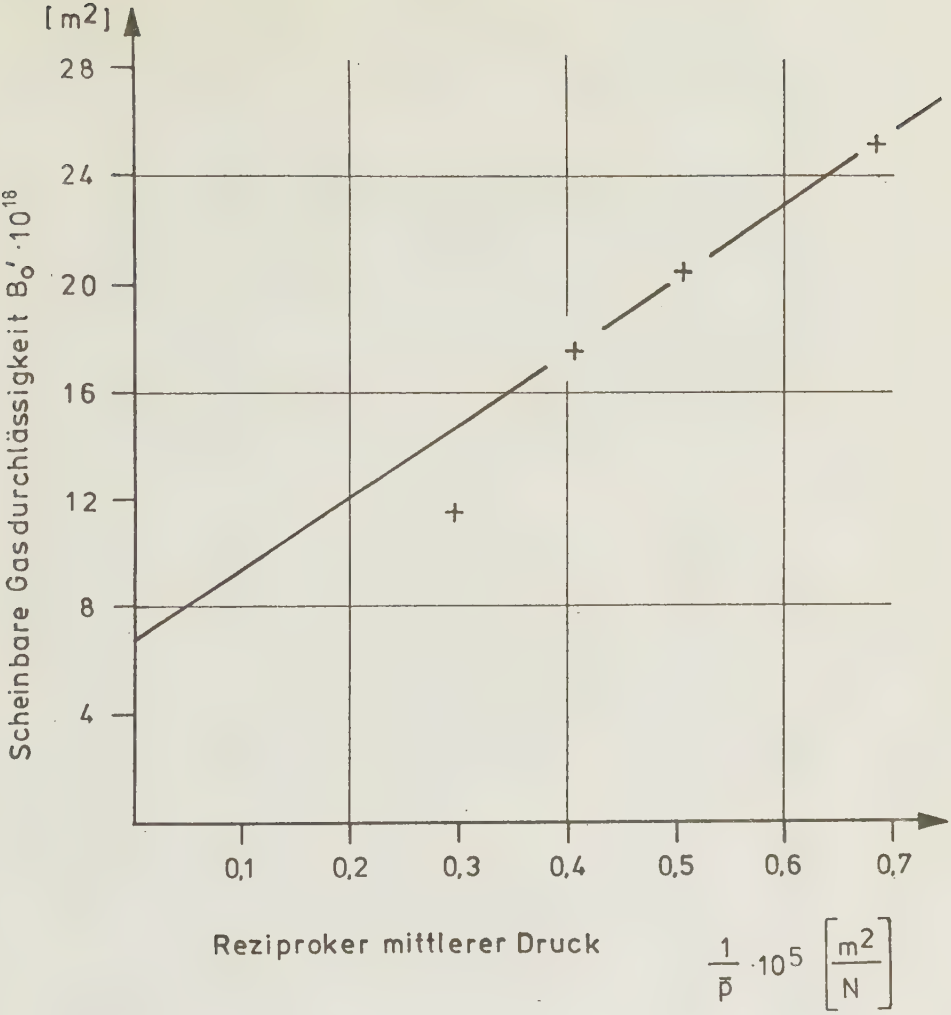


Bild 2.8/2: Abhängigkeit zwischen der scheinbaren Gasdurchlässigkeit B_o' und dem reziproken mittleren Druck

Luftdruck		Luftmenge [3]			Scheinbare Gasdurchlässigkeit	Viskoser Gasdurchlässigkeitskoeffizient	Gleitkonstante
p_1 [1] $[N \cdot m^{-2}]$	p_2 [2] $[N \cdot m^{-2}]$	Q_{viskos} $[m^3/s]$	$Q_{Gleiten}$ $[m^3/s]$	Q_{ges} $[m^3/s]$	B_o' $[m^2]$	B_o $[m^2]$	γ [m]
$2 \cdot 10^5$		$0{,}8 \cdot 10^{-8}$	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$	$3{,}3 \cdot 10^{-8}$	$25{,}1 \cdot 10^{-18}$		
$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$2{,}3 \cdot 10^{-8}$	$4{,}9 \cdot 10^{-8}$	$7{,}2 \cdot 10^{-8}$	$20{,}5 \cdot 10^{-18}$	$6{,}5 \cdot 10^{-18}$	$4{,}86 \cdot 10^{-8}$
$4 \cdot 10^5$		$4{,}3 \cdot 10^{-8}$	$7{,}3 \cdot 10^{-8}$	$11{,}6 \cdot 10^{-8}$	$17{,}6 \cdot 10^{-18}$		

[1] auf der Probenoberseite; [2] auf der Probenunterseite; [3] Menge, die die Probe (Ø = 10 cm; d=5 cm) durchströmt

Tabelle 2.8/2: Luftmenge Q_{ges}, die die Probe durchströmt (unterteilt in ihren viskosen Strömungsanteil und den Anteil der Gleitströmung) und die Strömungskennwerte B_o', B_o und γ in Abhängigkeit des Luftdruckes an der Probenoberseite.

sondern insbesondere bei niedrigen Luftdrücken wesentlich größer ist als der viskose Strömungsanteil.
Der viskose Gasdurchlässigkeitskoeffizient B_o und die Gleitkonstante γ sind normalerweise Stoffkonstanten. Beim Beton sind sie jedoch abhängig vom jeweiligen Hydratationsgrad. Mit fortschreitender Hydratation wird der Beton dichter und dadurch diese Größen entsprechend kleiner. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß der Beton durch die Luftdurchströmung nicht austrocknet.

B_o und γ wurden für den ca. 30 Stunden alten Spritzbeton zu

$$B_o \sim 6{,}5 \cdot 10^{-18} \quad [m^2] \quad \text{und}$$

$$\gamma \sim 4{,}86 \cdot 10^{-8} \quad [m]$$

bestimmt. Es kann mit diesen Werten und den Gleichungen (1) und (2) für beliebige Druckzustände, Spritzbetondicken und durchströmte Querschnittsflächen der Luftdurchsatz Q eines ca. 30 Stunden alten Spritzbetons bestimmt werden.

3 Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration bei unterschiedlichen Spritzbetontechniken

3.1 Allgemeines

3.1.1 Gesundheitsgefährdung durch Staub beim Betonspritzen - einige Grundbegriffe

In der VDI-Richtlinie 2262 [48] wird Staub als ein Kollektiv von festen oder flüssigen Partikeln mit Teilchengrößen unter 200 µm definiert, die in einem gasförmigen Medium dispergiert (zusammenhängend) sind und teilweise Nebel bilden können. Staub ist nach Schütz/Heidermanns [49] als gesundheitsgefährlich anzusehen, wenn durch seine Aufnahme in den menschlichen Körper Erkrankungen hervorgerufen werden; er gilt als inert,wenn außer einer geringen Beeinträchtigung der Funktion der Atemorgane keine spezifischen Krankheitserscheinungen verursacht werden. Zur Beurteilung der Gesundheitsgefahren sind neben der Staubkonzentration in der Atemluft insbesondere der Schadstoffgehalt und die Einwirkdauer zu berücksichtigen. Man unterscheidet nach Kaufmann [50] zwischen Gesamtstaub, Grobstaub und Feinstaub. Gesamtstaub ist der Anteil an Staub, der überhaupt eingeatmet werden kann. Grobstaub ist dasjenige Kollektiv, das beim Einatmen in den oberen Luftwegen bereits zurückgehalten wird. Feinstaub ist dæjenige Kollektiv, das beim Einatmen bis in die Alveolen (Lungenbläschen) gelangt.

Eine genaue Definition des Feinstaubes wurde in der Johannesburger Konvention festgelegt. Danach wird als Feinstaub ein Kollektiv bezeichnet, das ein Abscheidesystem passiert, das in seiner Wirkung der theoretischen Trennfunktion eines Sedimentationsabscheiders entspricht, der Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von 5µm abscheidet (s. Bild 3.1/1). Die Silikose ist eine Lungenerkrankung, die auf einer Schädigung bzw. Zerstörung der Alveolen beruht. Hervorgerufen wird diese Schädigung durch Staubteilchen, die freie kristaline Kieselsäure enthalten, und die im Alveolarbereich abgelagert werden.

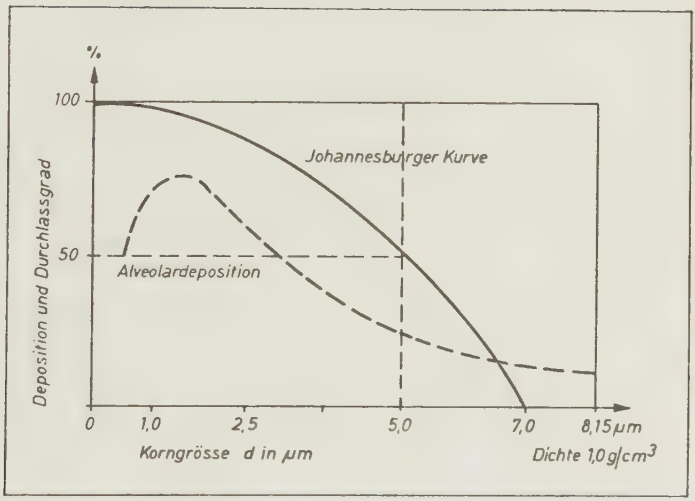


Bild 3.1/1: Staubniederschlag in der Lunge in Abhängigkeit des Korndurchmessers und Definition des Feinstaubes nach der Johannesburger Konvention nach Kaufmann [50]

Die Silikose ist eine Berufskrankheit und als solche entschädigungspflichtig [52]. Nach Kaufmann [50] läßt sich das Risiko einer Staublungenerkrankung mit folgender Funktion ausdrücken:

$$R = f\ (C_F,\ S,\ t,\ I)$$

mit C_F = Feinstaubkonzentration [mg/m³]
S = spez. Schädlichkeit, Schadstoff Quarz oder Asbest
t = Expositionszeit
I = Individualfaktor

Von dem eingeatmeten Staub verbleiben etwa nur 4 % in der Lunge. Der Rest wird wieder ausgeatmet. Die Silikose ist somit ein Staubbilanzproblem.

Nach Winkel [51] wird die Grenze der Lungengängigkeit des Staubes durch die Dichte der Teilchen und ihren isometrischen Bau beeinflußt. So gilt die im allgemeinen angenommene Grenze der Lungengängigkeit von < 5 µm nur für mineralische Teilchen mit isometrischem Bau und einer Dichte von etwa 2,5 g/cm³ bis 3 g/cm³, nicht aber für leichtere Kohleteilchen und für fadenförmige Stäube. Beim Betonspritzen interessiert damit in erster Linie nur der lungengängige Feinstaub mit Korngrößen < 5 µm. Der Staubniederschlag in den Alveolen in Abhängigkeit von der Teilchengröße ist aus Bild 3.1/1 ersichtlich. Quarzstäube mit einem Teilchendurchmesser von ca. 1 µm bis 2 µm sind danach am gefährlichsten. Als Richtschnur für unschädliche Konzentrationen am Arbeitsplatz gelten die sogenannten MAK-Werte (Maximale-Arbeitsplatz-Konzentration). Die MAK-Werte sind in der MAK-Wert-Liste zusammengefaßt. Der MAK-Wert ist die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz, die nach dem derzeitigen Stand der Kenntnis auch bei wiederholter und langfristiger, in der Regel täglich 8-stündiger Einwirkung, jedoch bei Einhaltung einer durchschnittlichen Wochenar-

beitszeit von 40 Stunden im allgemeinen die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt und diese nicht unangenehm belästigt. Gültig ist z.Zt. die MAK-Wert-Liste 1980 (s. Tabelle 3.1/1).

Staubmessungen bei Spritzbetonarbeiten ergaben, daß der Quarzgehalt im Feinstaub vielfach unter 1 % liegt [49], [52]. Der geringe Quarzanteil im Feinstaub ist nach [52] dadurch zu erklären, daß als Zuschlagsmaterial zur Spritzbetonherstellung nur gewaschenes Material verwendet wird, bei dem der Feinanteil herausgewaschen wurde. Der Zement selbst ist fast immer quarzfrei [49]. Jedoch kann je nach Zusammensetzung der Quarzgehalt im BE-Mittel nach Kaufmann [50] von unter 1 % bis zu ca. 30 % betragen. Ein hoher Quarzgehalt im Betonzusatzmittel kann u. U. nachteilig den Quarzgehalt im Feinstaub beeinflussen. Die Wahl des verwendeten BE-Mittels sollte daher nicht alleine durch die erforderliche Eignungsprüfung und den Preis vorgenommen werden, sondern auch unter Berücksichtigung des Quarzgehaltes.

Man kann also davon ausgehen, daß der Quarzgehalt im anfallenden Feinstaub bei Spritzbetonarbeiten mit entsprechender Zusammensetzung der Ausgangsmischung in vielen Fällen unter 1 % liegt (s. Bild 3.1/2). Dieser Staub ist damit als nicht silikogen anzusehen, und der entsprechende MAK-Wert für inerten Feinstaub liegt bei 8 mg/m³. Die gemessenen Feinstaubkonzentrationen auf Untertagebaustellen bei Trockenspritzbetonarbeiten übersteigen jedoch nach [52] in fast allen Fällen die zulässigen MAK-Werte um ein Vielfaches und erreichten Werte bis zu 70 mg/m³. Sutter [53], Kaufmann [50] und Ramisch [54] geben ebenfalls gemessene Feinstaubkonzentrationen bei Spritzbetonarbeiten untertage an, die den zulässigen MAK-Wert erheblich überschreiten. Die in diesem Kapitel angegebenen MAK-Werte gelten strenggenommen nur in atmosphärischem Luftdruck. Ob diese MAK-Werte auch in Luftüberdruck ihre Gültigkeit haben, soll im Rahmen eines Forschungsvorhabens, das

Quarzgehalt [Gew.-%]	MAK-Wert [mg/m³]	Bezugskonzentration	
< 1	8	Feinstaub	Inert
1 ≤ Q ≤ 4	4	Feinstaub	Silikogen
Q ≥ 4	0,15	Quarzfeinstaub	Silikogen

Tabelle 3.1/1: MAK-Werte für inerten Feinstaub, quarzhaltigen Feinstaub und Quarzfeinstaub

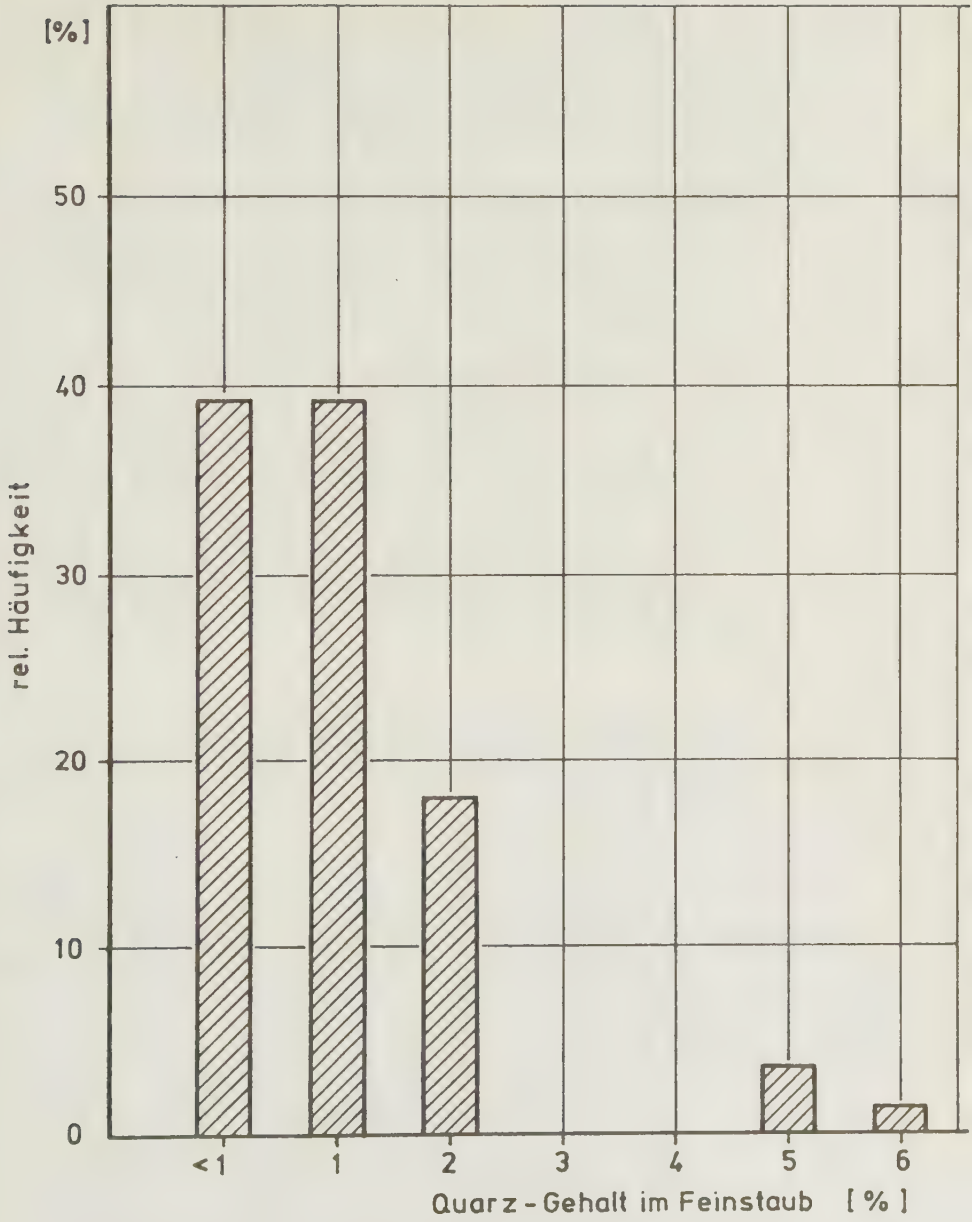


Bild 3.1/2: Relative Häufigkeit der Quarzgehalte im Feinstaub von 62 Staubproben nach Kaufmann [50]

unter der wissenschaftlichen Leitung von Herrn Prof. Hilscher steht, am Institut für Umwelthygiene der Technischen Universität Düsseldorf durchgeführt werden. Hierbei sollen Tierversuche Aufschlüsse über das Gefährdungsrisiko bei der Einwirkung von Staub in Luftüberdruck auf den menschlichen Organismus geben.

Die optimale Methode, Staub zu verhindern, ist, den Staub direkt am Entstehungsort zu bekämpfen. Deshalb ist eine systematische Untersuchung der Einflußparameter beim Betonspritzen, die die Größe der Feinstaubkonzentrationen bestimmen, von großer Bedeutung. Die Ergebnisse aus den Versuchen zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration (s. Kapitel 3.2) haben nichts mit MAK-Werten zu tun, da zur Ermittlung des MAK-Wertes die "Empfehlungen zur Messung und Beurteilung von gesundheitsgefährlichen Stäuben" [55] eingehalten werden sollten. Ziel der Staubmessungen ist es, lediglich aufzuzeigen, wovon die Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich hauptsächlich abhängt (s. Kapitel 3.1.2).

Wenn Arbeiten in Druckluft ausgeführt werden, bei denen Stäube unvermeidbar sind, stellen sich häufig folgende Fragen:

(a) Verhindert die höhere Luftdichte in Überdruckbereichen ein schnelles Absinken der lungengängigen Feinstaubteile ($d < 5\mu m$) und führt so zu einer größeren Staubbelästigung als unter atmosphärischem Luftdruck?

(b) Wird die Ausbreitung des lungengängigen Feinstaubes (Flugverhalten) in Druckluft durch die höhere Luftdichte eingeschränkt? Dies kann als Vorteil gesehen werden, da es nur an örtlich ganz bestimmten Stellen, an denen Staub entsteht, zu Belästigungen kommt. Nachteilig jedoch ist, daß die Menschen, die in diesem Bereich arbeiten, einer wesentlich höheren Staubkonzentration ausgesetzt sind.

zu a): Sinkgeschwindigkeit des lungengängigen Feinstaubes (d < 5 µm) in Druckluft

Mit Hilfe der Reynold-Zahl wird der Strömungsbereich bestimmt. Wenn die Reynold-Zahl $Re_s \leq 0{,}2$ (Stokes- Bereich) ist, dann ist die Einzelkornsinkgeschwindigkeit W_s in der Atmosphäre und in Luftüberdruck (bis 3 bar) gleich groß.
Für die Reynold-Zahl gilt:

$$Re_s = \frac{W_s \cdot d}{\nu_f} \leq 0{,}2 \text{ (Stokes-Bereich)}$$

W_s = Einzelkornsinkgeschwindigkeit

d = Korndurchmesser

ν_f = kinematische Viskosität der Luft

$\nu_f = \frac{\eta}{\varrho}$

$\eta \sim 18 \cdot 10^{-6}$ (Luftviskosität)

ϱ = Luftdichte

Für die Einzelkornsinkgeschwindigkeit im Stokes-Bereich gilt:

$$W_s = \frac{1}{18} \frac{\varrho_s - \varrho}{\eta} g \cdot d^2$$

mit

ϱ_s = Feststoffdichte und g = Erdbeschleunigung

Für atmosphärischen Luftdruck erhält man für den größten Korndurchmesser des lungengängigen Feinstaubes
$d = 5$ µm und $\varrho_s = 2650$ kg/m³:

$$W_{s_a} = \frac{1}{18} \frac{2650 - 1{,}23}{18} \cdot 10^6 \cdot 9{,}81 \cdot (5.10^{-6})^2$$

$$W_{s_a} = 0{,}002 \text{ m/s}; \quad Re_s = \frac{0{,}002 \cdot 10.10^{-6}}{14{,}6} \cdot 10^6 =$$

$$0{,}001 < 0{,}2$$

und für 3 bar Luftüberdruck ergibt sich:

$$W_{s_d} = \frac{1}{18} \cdot \frac{2650 - 4 \cdot 1{,}23}{18} \cdot 10^6 \cdot 9{,}81 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2$$

$$W_{s_d} = 0{,}002 \text{ m/s};$$

$$Re_s = \frac{0{,}002 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{3{,}64} \cdot 10^6 = 0{,}006 < 0{,}2$$

Die ermittelten Sinkgeschwindigkeiten sind im obigen Beispiel also gleich groß. Der lungengängige Feinstaub verhält sich damit im Hinblick auf sein Sinkverhalten in Druckluft (bis 4 bar absolut) genauso wie in der Atmosphäre.

zu b): Flugverhalten des lungengängigen Feinstaubes ($d < 5$ µm) in Druckluft

Bohnet [22] gibt für den Gültigkeitsbereich des Stokesschen Widerstandsgesetzes die Flugweite kugeliger Teilchen, die in ruhende Luft eingeschossen werden, wie folgt an:

$$S_{max} = \frac{W_f}{g} \cdot c$$

S_{max} = maximale Flugweite [m]
g = Erdbeschleunigung [m/s²]
c = Materialgeschwindigkeit [m/s]
W_f = Sinkgeschwindigkeit [m/s]

Da unter Punkt a) bereits gezeigt wurde, daß im betrachteten Bereich die Sinkgeschwindigkeiten in der Atmosphäre und in Druckluft gleich sind, ist die Flugweite nur noch von der Materialgeschwindigkeit c abhängig. Bei hohen Materialgeschwindigkeiten bzw. Relativgeschwindigkeiten wird kurzfristig der Stokes-Bereich verlassen. Die lungengängigen Feststoffteile werden dann auf relativ kurzer Strecke so stark abgebremst, daß sie schnell wieder in den Stokesschen-Strömungs-

bereich fallen. Hier jedoch geht im Widerstandsgesetz die Luftdichte überhaupt nicht ein, so daß praktisch das Flugverhalten des lungengängigen Feinstaubes (d =<5 µm) in Arbeitsluftüberdrücken bis 3 bar und in der Atmosphäre gleich ist.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß die Sinkgeschwindigkeit und das Flugverhalten des lungengängigen Feinstaubes (d < 5 µm) sich in der freien Atmosphäre und in Luftüberdruck (bis 3 bar) nicht nennenswert unterscheiden.

3.1.2 Ziel der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration

Ziel der geplanten Staubversuche war es, die lungengängige Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich in Abhängigkeit von verschiedenen Ausgangsbedingungen zu messen und - wenn möglich - Vorschläge für eine Staubreduzieru zu unterbreiten. Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund , die mit Hilfe von zahlreichen Tastversuchen geklärt we den sollten:

- Ist bei Spritzbetonarbeiten die Staubkonzentration im erhöhten Luftdruckbereich größer, als unter normalen atmosphärischen Bedingungen?

- Welchen Einfluß hat die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung auf die Staubentwicklung?

- Stimmt es, daß durch den Einsatz einer Vorbenetzungseinrichtung beim Trockenspritz-Verfahren der Staub an der Spritzdüse reduziert wird?

- Entsteht beim Naßspritzen im Dünnstrom weniger Staub, als beim Trockenspritzen?

- Kann der Staub durch Betonzusatzmittel reduziert werden?

- Welchen Einfluß hat der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine auf die Staubbelastung?

Zum Vergleich der Staubentwicklung im atmosphärischen bzw. Überdruckluftbereich mußten für beide Fälle gleiche Ausgangsbedingungen geschaffen werden. Daher wurde auch ein Teil der atmosphärischen Staubversuche in der Druckluftkammer (Innenüberdruck 0 bar) durchgeführt. Der Versuchsaufbau hierfür ist in Bild 3.1/3 dargestellt. Ferner wurden Staubversuche in einem Versuchsstollen in Winterthur (s. Bild 3.1/4) und in einem abgeschotteten Tunnelbereich (Versuchsraum Nr. 1: Höhe/Länge/Breite ~ 2,5 m/20 m/6 m und Versuchsraum Nr. 2: Höhe/Länge/Breite ~ 2,5 m/7 m/3m) auf dem Stadtbahnbaulos 6/7 in Duisburg durchgeführt.

Das Staubprobenahmegerät (VC 25) war bei den Versuchen in Winterthur und Duisburg auf einem Stativ in ca. 1 m

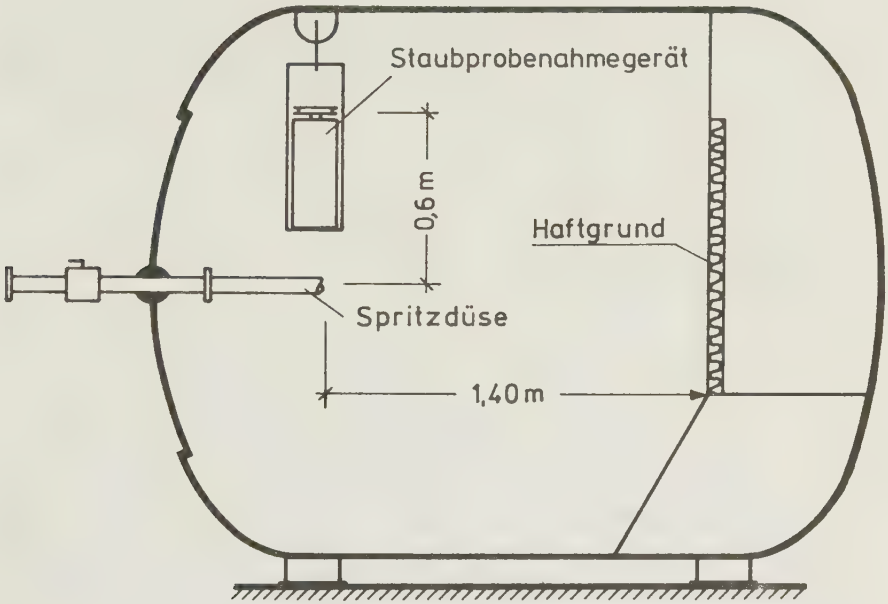


Bild 3.1/3: Versuchsaufbau für die Staubmessungen in der Versuchskammer

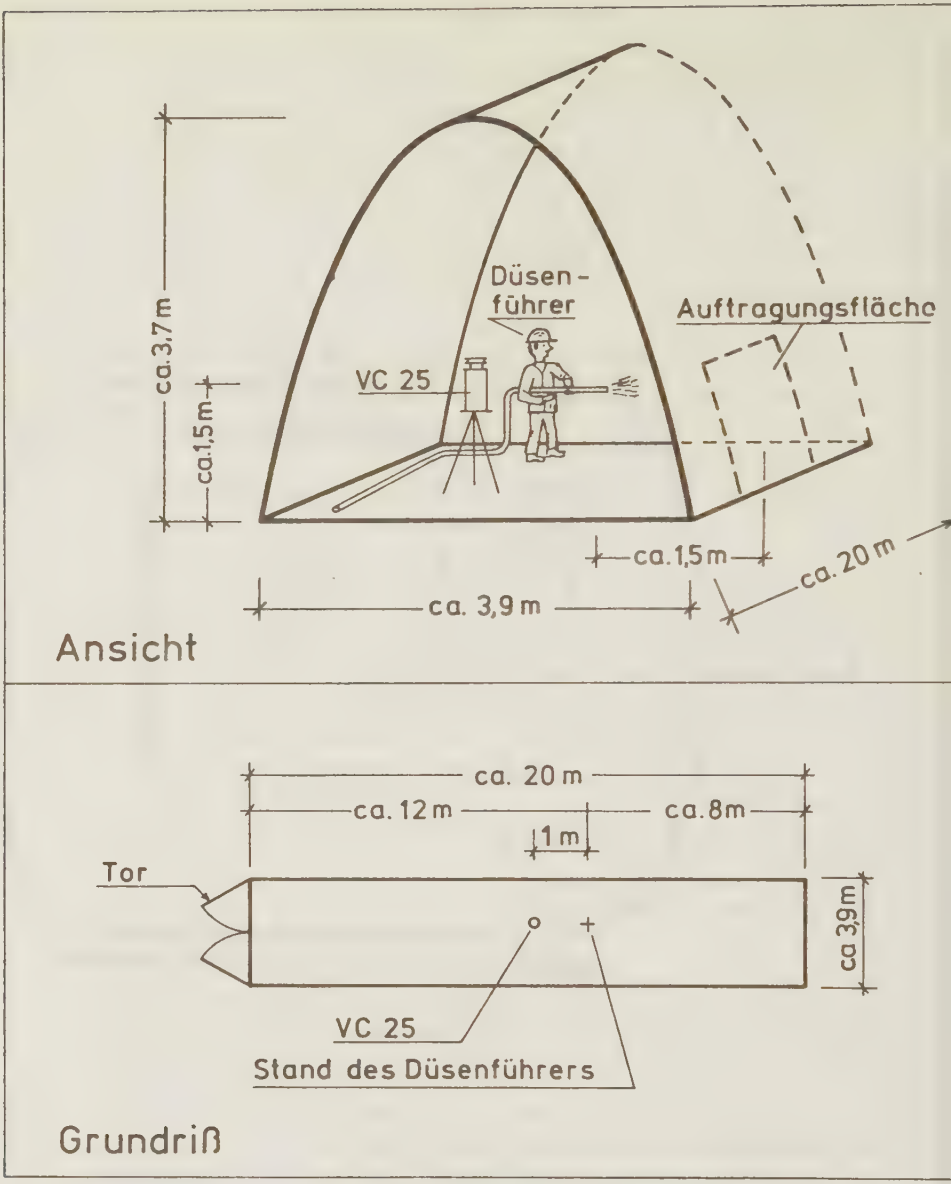


Bild 3.1/4: Versuchsaufbau für die Staubmessungen in einem Versuchsstollen in Winterthur (Schweiz)

Entfernung vom Düsenführer so aufgebaut, daß der Ansaugstutzen des Gerätes in ca. 1,50 m Höhe reichte.

Alle durchgeführten Staubmessungen erfolgten nur während des Betonspritzens. Die Spritzdüse (ein ca. 40 cm langes Stück vom Förderschlauch mit einem Durchmesser von 50 mm) wurde hierbei horizontal gehalten und der Spritzbeton auf eine nahezu lotrechte, ebene Wand aufgetragen. Der Abstand der Spritzdüse zur Auftragungsfläche betrug ca. 1,5 m. Die exakte Staubmeßzeit von ca. 4 bis 6 Minuten wurde mit Hilfe einer Stoppuhr festgehalten. Ebenso wurden die Wasserzugabemenge und der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine konstant gehalten und mitprotokolliert.

Die Feinstaubmenge auf den jeweiligen Filtern wurde zuerst in einer Schnellanalyse von der TBG (Tiefbauberufsgenossenschaft) quantitativ bestimmt. Dies hatte den großen Vorteil, daß sehr rasch für das weitere Vorgehen Entscheidungshilfen vorlagen. Anschließend wurden die Staubfilter zur genaueren Auswertung zum BIA (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit) nach Bonn geschickt.

3.1.3 Wahl des Staubprobenahmegerätes

Beim Betonspritzen entsteht ein Staub, der u.a. Zement und Feuchtigkeit enthält. Bei Probenahmen von solchen Stäuben stellte sich nach Kaufmann [56] heraus, daß alle verwendeten Staubprobenahmegeräte sehr stark verschmutzten und zum größten Teil aufgrund ihrer mechanischen Konzeption nur äußerst schwierig zu reinigen waren. Die sogenannten Gesamtstaubgeräte sind zur Probenahme von Spritzbetonstaub ungeeignet, weil der gesammelte Staub infolge des Zementgehaltes und der Feuchtigkeit zu einem Kuchen zusammenbackt und dadurch die üblicherweise bei der Auswertung verwendete Sedimentationsanalyse nicht mehr durchgeführt werden kann. Zur Probenahme sind nach [56] nur Geräte verwendbar, die über einen Vorabscheider verfügen und bei denen der Weg von der Ansaugöffnung zum Staubfilter möglichst kurz und für Reinigungszwecke gut zugänglich ist. Geräte mit Zyklonen als Vorabscheider oder Plattenpaketen (Horizontalelutriator) zur Ab

trennung des Grobstaubes scheiden aus, weil sie diese Voraussetzung nicht erfüllen [56]. Außerdem war kein Gerät bekannt, mit dem Erfahrungen für Staubmessungen in Druckluft vorlagen. Es war deshalb zu erwarten, daß bei Messungen in Druckluft gewisse Veränderungen am Meßgerät erforderlich waren. Die Wahl fiel schließlich auf das VC 25 mit aufgesetztem Feinstaubtopf, da es folgende wichtige Vorteile bietet:

- Der Staubanfall wird gleich in Grob- und Feinstaub im Gerät getrennt

- Die Filter lassen sich relativ schnell auswerten

- Das Gerät ist relativ klein, leicht und handlich

- Das VC 25 wird von der TBG (Tiefbauberufsgenossenschaft) in letzter Zeit bevorzugt auf Untertagebaustellen eingesetzt

- Die Luftdurchsatzmenge des VC 25 von ca. 22,5 m^3/h ist sehr groß, so daß relativ kurze Meßzeiten möglich sind

- Das VC 25 wurde vom BIA (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, früher: Staubforschungs-Institut des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften) in Bonn entwickelt (vgl.[57]). Dieses Institut ist deshalb in der Lage, schnell die gegebenenfalls erforderlichen Umbauten am Gerät für Messungen in Druckluft vorzunehmen.

Schematisch ist das Gerät in Bild 3.1/5 dargestellt. Die Funktionsweise des VC 25 ist in [58] beschrieben.

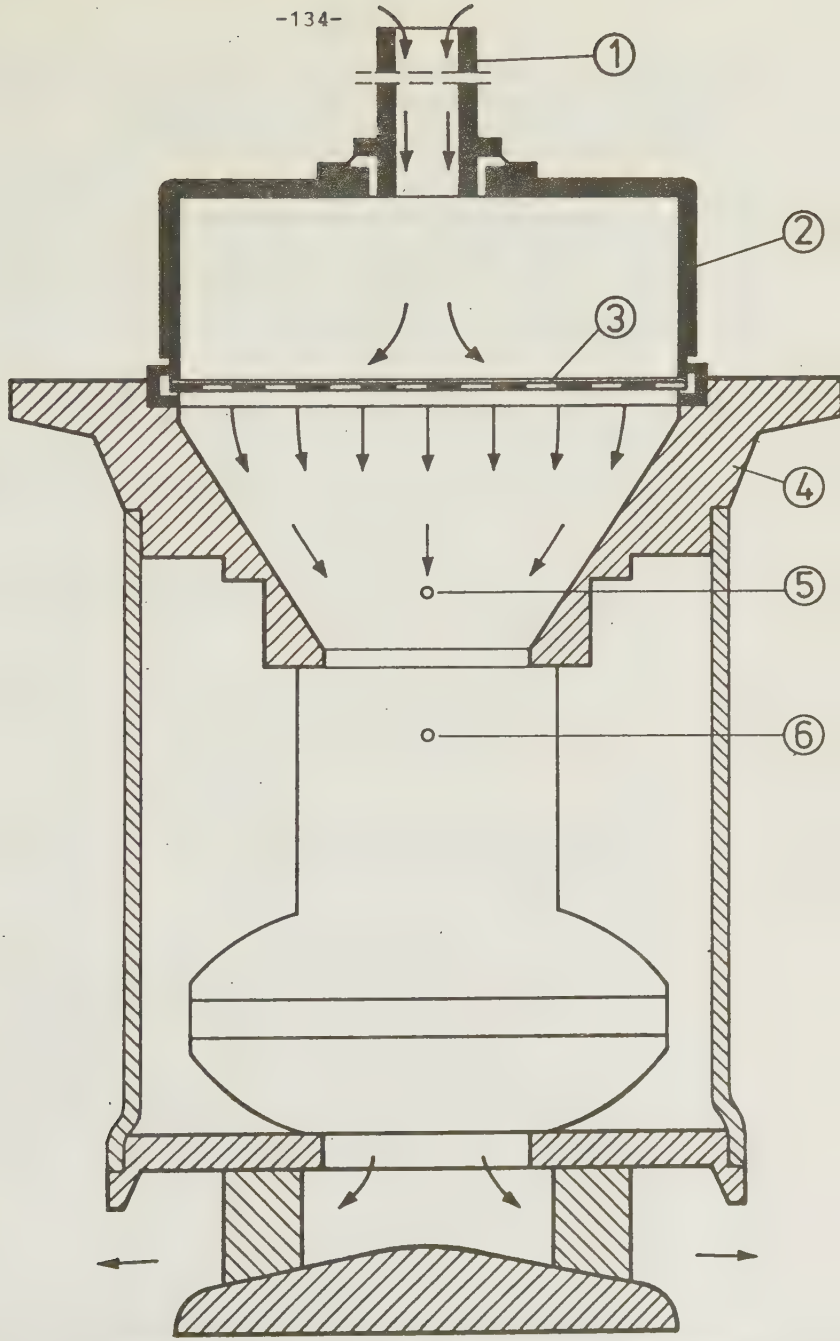


Bild 3.1/5: Schematische Darstellung des Staubprobenahmegerätes VC 25

① Einströmdüse ② Vorabscheider-Topf ③ Filter

④ Gerätekörper ⑤ Heißleiter zur Regelung des Gebläses

⑥ Gebläse

3.2 Ergebnisse und Diskussion der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration

Die Tabellen 3.2/1 bis 3.2/3 geben eine Übersicht der durchgeführten Versuche. Wegen der unterschiedlichen Ausgangsbedingungen sollten die Meßergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration in der Versuchskammer in Winterthur und Duisburg nur qualitativ und nicht absolut miteinander verglichen werden.

Obwohl die Versuchsergebnisse strenggenommen nur für die vorliegenden Ausgangsbedingungen (Ausgangsmischung, Maschineneinsatz usw., siehe Hinweise in Kapitel 3.1) gelten, rechtfertigen die Beobachtungen die Annahme, daß sie tendenziell auch durch die allgemeine Praxis bestätigt werden:

(1) Einfluß der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung auf die Feinstaubkonzentration

Der Einfluß der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung auf die Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich ist qualitativ Bild 3.2/1 zu entnehmen:

- Die Feinstaubkonzentration nimmt mit größer werdender Eigenfeuchte der Ausgangsmischung im Bereich von 0 % bis ca. 1 % ab (s. Bild 3.2/2)

- Die Feinstaubkonzentration wächst bei weiter ansteigender Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 1 % bis ca. 4 %. Eine Anhebung der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung bei den Versuchen in der Versuchskammer von z.B. 1 % auf 4 % vergrößerte die Feinstaubkonzentration um ca. 75 % (s. Bild 3.2/3). Die Staubmessungen im Versuchsstollen ergaben bei den dort untersuchten Eigenfeuchten analoge Verhältnisse (s. Bild 3.2/4).

- Bei einer weiteren Vergrößerung der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung ab ca. 4 % geht die Staubbelastung spürbar zurück. Bei z.B. einer Erhöhung der Eigen-

Anzahl der Versuche	Spritzverfahren Naß[1] W/Z	Trocken	Luftüberdruck in der Versuchskammer in bar				Ort der Wasserzugabe Düse	Vor-[2] benetzung	Eigenfeuchte der Ausgangsmischung in % ca.				Förderdruck an SBM[3] [bar]	BE-Mittel- bzw. Kleberzugabe	
			0	1	2	3			0 - 1%	1,1-2%	2,1-3%	3,1-4%		ja	nein
2	0,4	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	X	-
2	0,4	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	X
2	0,36	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	X	-
2	0,36	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	X
1	-	X	X	-	-	-	X	-	X	-	-	-	3	-	X
1	-	X	X	-	-	-	X	-	-	X	-	-	3	-	X
1	-	X	X	-	-	-	X	-	-	-	X	-	3	-	X
1	-	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-	X	3	-	X
1	-	X	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	3	-	X
3	-	X	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-	3	-	X
2	-	X	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-	3	-	X
3	-	X	X	-	-	-	-	X	-	-	-	X	3	-	X
1	-	X	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	2	-	X
2	-	X	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-	2	-	X
7	-	X	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	3	X	-
4	-	X	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-	3	X	-
1	-	X	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-	3	X	-
2	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	X	-	4	-	X
1	0,36	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	7	-	X
2	-	X	-	-	X	-	-	X	-	-	X	-	6	-	X
1	-	X	-	-	X	-	-	X	-	X	-	-	5	-	X
1	-	X	-	-	X	-	-	X	-	-	X	-	5	-	X
5	-	X	-	-	-	X	-	X	X	-	-	-	6	-	X
1	-	X	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-	6	-	X
4	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X	-	6	-	X
4	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	-	X	6	-	X
1	-	X	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-	6	X	-
1	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X	-	6	X	-
1	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X	-	5	-	X

[1] (im Dünnstrom); Spritzbetonmaschine Sperno 104

[2] ca. 4,50 m vor der Austrittsöffnung der Düse

[3] SBM = Spritzbetonmaschine

Tabelle 3.2/1: Variantenübersicht der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration in der Druckluftkammer

Anzahl der Versuche	Förderdruck an der SBM[1] [bar]	Ort der Wasserzugabe: Düse	Ort der Wasserzugabe: Vorbenetzung[2]	Eigenfeuchte der Ausgangsmischung: 2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	BE-Mittel (B)- bzw. Kleberzugabe (K): ja	nein
2	3	-	X	X	-	-	-	-	-	X
3	3	X	-	-	X	-	-	-	-	X
4	3	-	X	-	X	-	-	-	-	X
3	3	X	-	-	X	-	-	-	K	-
4	3	-	X	-	X	-	-	-	K	-
4	3	X	-	-	-	X	-	-	-	-
4	3	-	X	-	-	X	-	-	-	-
4	4,5	X	-	-	-	-	X	-	-	-
3	4,5	-	X	-	-	-	X	-	-	-
3	6	-	-	-	-	-	-	X	K	-
2	3	-	X	-	X	-	-	-	B	-

1) SBM = Spritzbetonmaschine Meyco GM 090 (Trockenspritz-Maschine)

2) ca. 4,50 m vor der Austrittsöffnung der Düse

Tabelle 3.2/2: Variantenübersicht der Versuche zur Ermittlung der Feinstaubkonzentration in einem Versuchsstollen in Winterthur (Schweiz)

Anzahl der Versuche	Zementart	BE-Mittelzugabe			Kleberzugabe			Ort der Wasserzugabe		Bestimmung der	
		nein	MC-Spritzhilfe	Guttacret	ja 1,5 %	ja 3 %	nein	Düse	Vorbenetzung	Feinstaubkonzentration	Druckfestigkeit
3	HOZ[1]	X	-	-	-	-	X	-	X	X	-
3		-	X	-	-	-	X	-	X	X	X
3		-	X	-	-	X	-	-	X	X	X
3		X	-	-	X	-	-	-	X	X	-
3		-	X	-	X	-	-	-	X	X	-
2	PZ[2]	X	-	-	-	-	X	X	-	X	X
2		-	X	-	-	-	X	X	-	X	X
2		-	-	X	-	-	X	X	-	X	X
2		X	-	-	-	X	-	X	-	X	X
2		-	X	-	-	X	-	X	-	X	X
2		-	-	X	-	X	-	X	-	X	X

1) Versuchsraum Höhe/Länge/Breite 2,5 m/20 m/6 m 2) Versuchsraum Höhe/Länge/Breite 2,5 m/7 m/3 m

Tabelle 3.2/3: Variantenübersicht der Versuche zur Bestimmung der Feinstaubkonzentration bzw. der Druckfestigkeit in einem Versuchsraum in Duisburg. Die Versuche wurden mit einer Spritzbetonmaschine Typ BHSE (Trockenspritz-Maschine) durchgeführt (Ausgangsmischung: Sieblinie B_8; Zementgehalt 370 kg/m³; Zusatzstoff 50 kg/m³ Füller; Eigenfeuchte ca. 3 %).

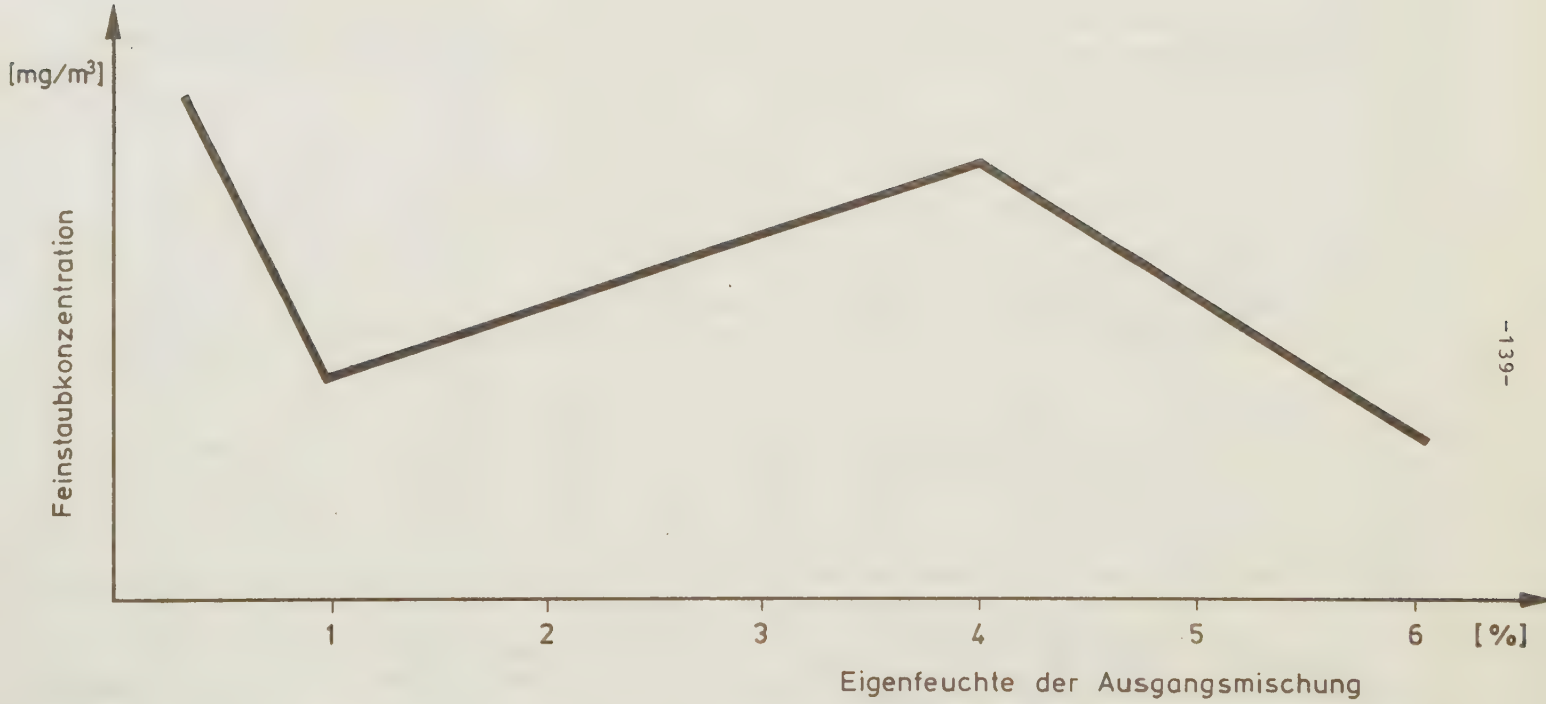


Bild 3.2/1: Qualitativer Verlauf der Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung (zusammengestellt aus den Messungen in der Versuchskammer und im Versuchsstollen).

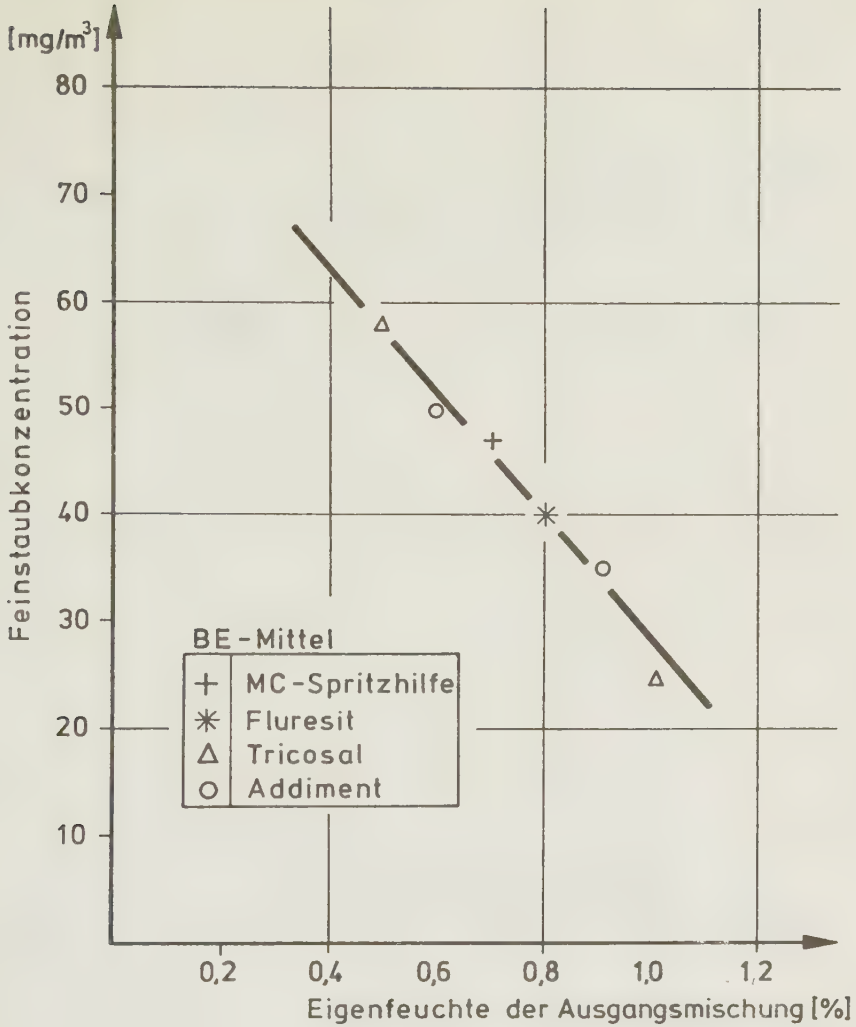


Bild 3.2/2: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung. Die dargestellten Meßergebnisse wurden in der Versuchskammer bei atmosphärischem Luftdruck ermittelt. Die Wasserzugabe erfolgte durch eine Vorbenetzung.

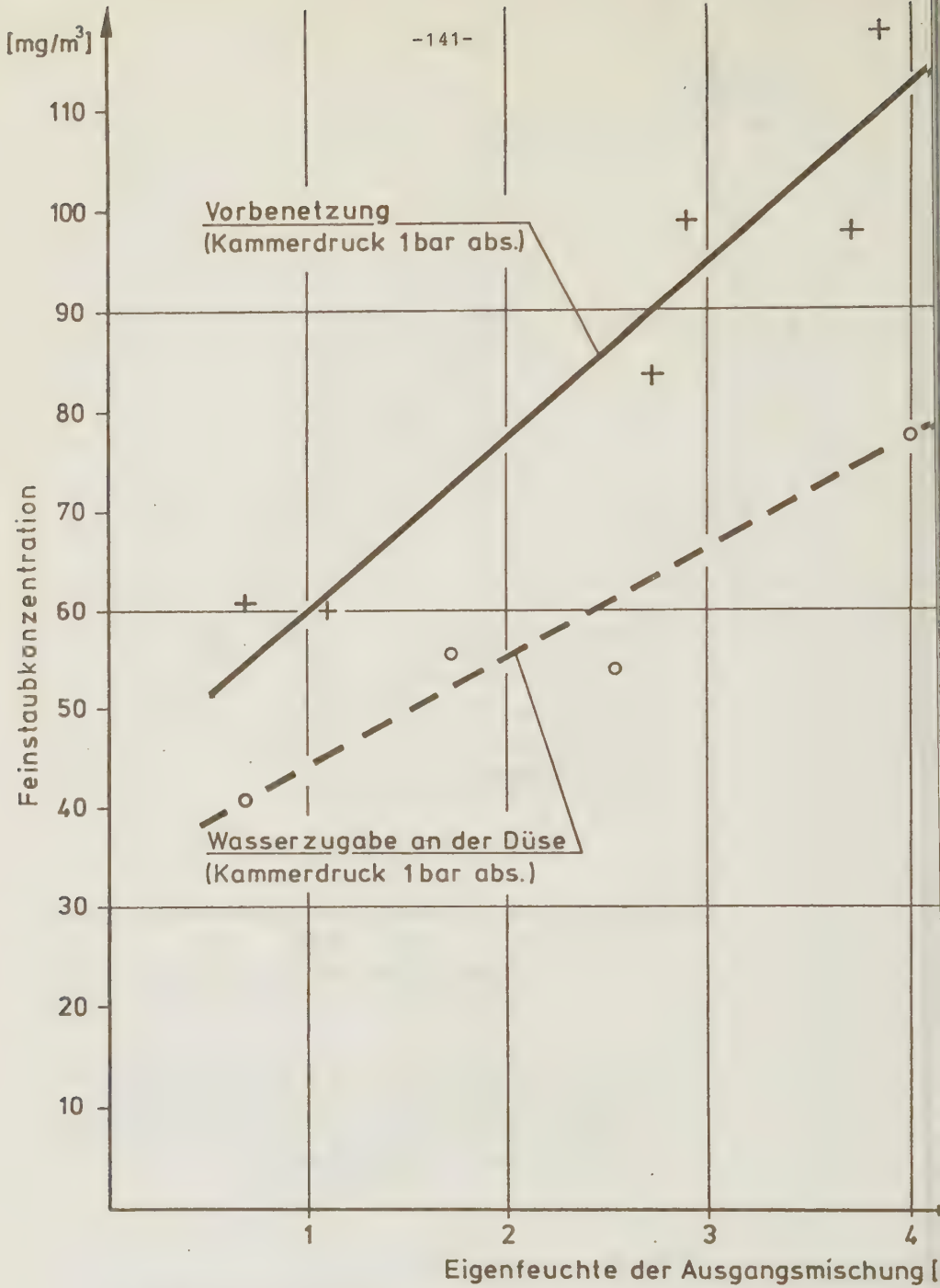


Bild 3.2/3: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und vom Ort der Wasserzugabe. Die dargestellten Meßergebnisse wurden in der Versuchskammer bei atmosphärischem Luftdruck ermittelt.

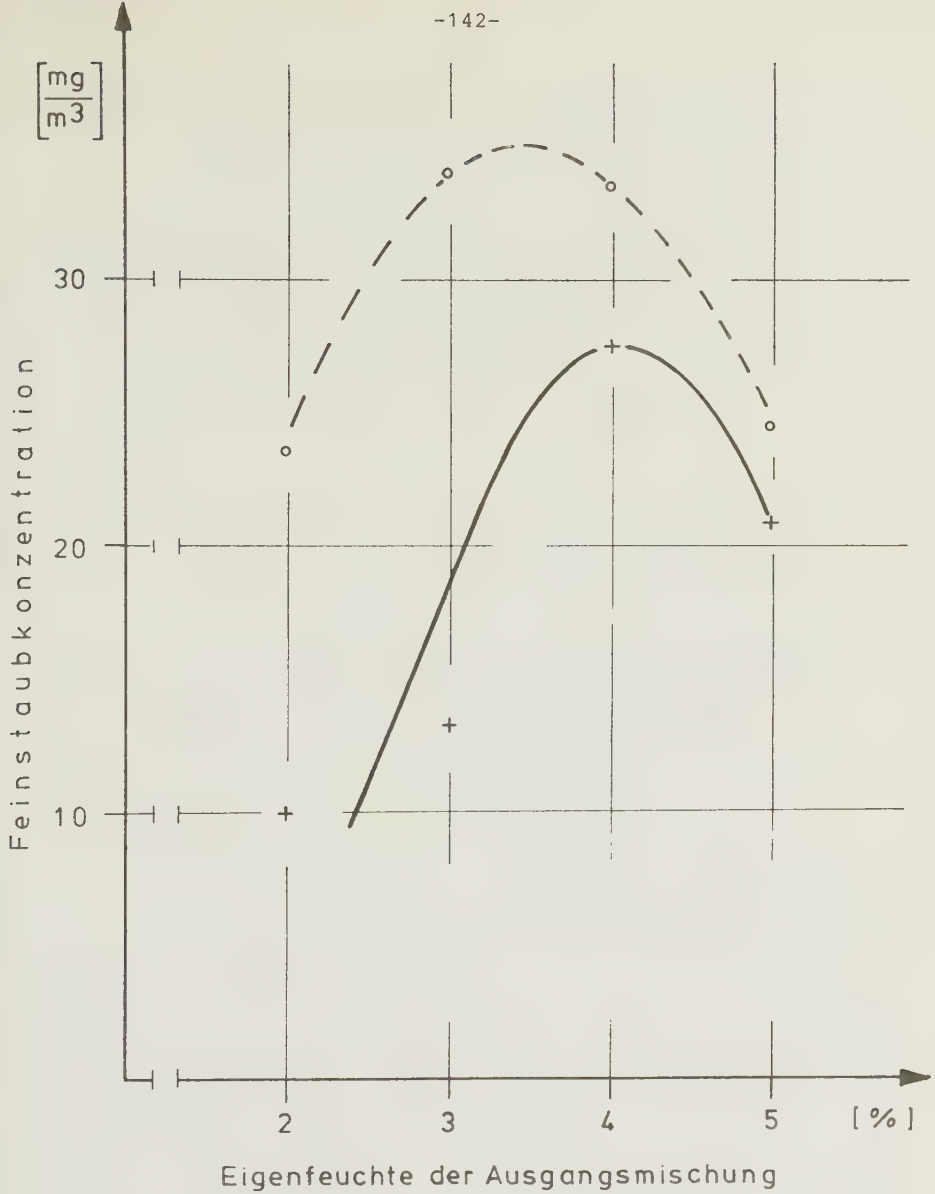


Bild 3.2/4: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und vom Ort der Wasserzugabe. Die dargestellten Meßergebnisse wurden in einem Versuchsstollen in Winterthur (Schweiz) ermittelt.

feuchte der Ausgangsmischung von 4 % auf 5 % wird die Feinstaubkonzentration um ca. 25 % bzw. 30 % reduziert (s. Bild 3.2/4).

Die obigen Versuchsergebnisse widersprechen teilweise der bislang allgemein verbreiteten Auffassung. Eine höhere Eigenfeuchte der Ausgangsmischung - so wurde argumentiert - bindet die Feinstteile in der Betonmischung (die Feinstanteile lagern sich an größeren Zuschlagskörnern an), und es entsteht weniger Staub. Dies wird eindrucksvoll in Bild 3.2/4 (Wasserzugabe an der Düse) widerlegt, da eine relative feuchte Ausgangsmischung mit einer Eigenfeuchte von 5 % mehr Staub beim Spritzen verursacht, als z.B. eine übliche Baustellenmischung von 3 % Eigenfeuchte.

Vermutlich wird aber die Anlagerung von Feinstteilen bei hoher Eigenfeuchte der Ausgangsmischung durch den Transportvorgang wieder zerstört. Beim Transport stoßen die Materialteile zusammen und prallen ebenfalls gegen die Förderschlauchwandung. Dieses bewirkt, daß sich die angelagerten Feinstanteile wieder lösen können bzw. kleine Materialanhäufungen zerrieben werden. Dadurch entsteht ein Gemisch, das im Düsenbereich anteilig wieder relativ viel Feinstanteile besitzt. Bei hoher Eigenfeuchte der Ausgangsmischung ist, wenn der Gesamtwassergehalt unverändert bleiben soll, die Wasserzugabemenge gering und umgekehrt (s. Bild 2.2/2). Dieses Wasser wird über Düsen, die in Höhe der Förderschlauchwandung angebracht sind, in den Förderstrom eingespritzt. Die Förderdruckluft und das Material drücken teilweise das Wasser an der Schlauchwandung entlang ins Freie. Hier bildet dieses Wasser einen Schirm um das Fördermaterial, der es dem Staub erschwert, sich auf dem Weg von der Spritzdüse zur Auftragungsfläche ungehindert auszubreiten.

Bei einer Eigenfeuchte von z.B. 1 % bzw. 4 % werden bei

den hier vorliegenden Verhältnissen und unverändertem Gesamtwassergehalt nach Bild 2.2/2 ca. 9 l/min bzw. 4 l/min Wasser zugegeben. Bei einer Eigenfeuchte von 4 % ist also der sich ausbildende Wasserschirm vergleichsweise klein, und es werden nur wenige Staubteile, die in den Wasserschirm gelangen, von diesem mit zur Auftragungsfläche gerissen, oder aber so stark benetzt, daß sie nicht mehr sehr weit fliegen können und zu Boden sinken. Es entsteht also relativ viel Staub.

Im Bereich der Eigenfeuchten der Ausgangsmischungen von ca. 1 % bis 4 % ist also für eine geringe Staubentwicklung die Größe des Wasserschirmes um das Fördermaterial ausschlaggebend. Bei Eigenfeuchten der Ausgangsmischung unter ca. 1 % bzw. über ca. 4 % (s. Bild 3.2/1) reicht jedoch der Wasserschirm nicht mehr aus, da die Ausgangsmischung zu trocken bzw. die Wasserzugabe zu gering ist. In diesen Fällen wirkt sich deshalb eine Zunahme der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung wieder günstig aus.

Eine Verminderung der Staubbelastung im Spritzdüsenbereich durch sogenannte Vorbefeuchtungsanlagen, die die Ausgangsmischung kurz vor der Aufgabe in die Trockenspritzmaschine vornässen, ist nach Bild 3.2/4 bei normalem Baustellenbetrieb mit Eigenfeuchten der Ausgangsmischungen um ca. 3 % bei der Wasserzugabe an der Düse wenig wahrscheinlich bzw. bei einer Vorbenetzung (s. (2)) nur möglich, wenn die Eigenfeuchte des Materials durch diese Anlagen auf ca. 5 % erhöht werden kann. Bei solch hohen Eigenfeuchten muß jedoch beim Trockenspritzverfahren mit Förderproblemen gerechnet werden. Man ist dann nämlich fast schon - was die Eigenfeuchte des Materials betrifft - beim Naßspritzverfahren im Dünnstrom angelangt.

(2) Einfluß des Ortes der Wasserzugabe auf die Feinstaubkonzentration

Der Ort der Wasserzugabe ist für die Staubentwicklung

im Spritzdüsenbereich ebenfalls entscheidend (s. Bilder 3.2/3 und 3.2./4). Bei einer Vorbenetzung (die Wasserzugabe erfolgt hier einige Meter vor der Austrittsöffnung des Förderschlauches) kann sich das Material auf den letzten Metern im Förderschlauch gut mit dem Wasser vermischen und dadurch mehr Wasser binden. Dies bedeutet aber auch, daß sich ein geringerer Wasserschirm um das Material ausbildet (siehe hierzu auch (1)) und somit eine größere Staubentwicklung möglich ist als bei der Wasserzugabe an der Düse. Die Ergebnisse der Versuche in der Versuchskammer zeigen deshalb auch (s. Bild 3.2/3), daß die Feinstaubkonzentration bei Einsatz einer Vorbenetzung um ca. 40 % höher liegt als bei der Wasserzugabe an der Düse. Die Staubmessungen im Versuchsstollen lassen erkennen, daß insbesondere bei einer Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 3 % die Wasserzugabe direkt an der Düse Vorteile bietet. Hier wird gegenüber einer Vorbenetzung die Feinstaubkonzentration um ca. 60 % reduziert (s. Bild 3.2/4). Bei geringen ($\leq$ ca. 1 %) bzw. hohen ($\geq$ ca. 5 %) Eigenfeuchten der Ausgangsmischung spielt der Ort der Wasserzugabe (Düse bzw. Vorbenetzung) eine weniger große Rolle (s. Bilder 3.2/3 und 3.2/4). Bei einer geringen Eigenfeuchte ist die Ausgangsmischung so trocken, daß das einige Meter vor der Düse (Vorbenetzung) zugegebene Wasser den Staub wahrscheinlich genauso gut bindet bzw. abschirmt, wie der sich bildende Wasserschirm bei der Wasserzugabe an der Düse. Und bei hohen Eigenfeuchten ist es praktisch gleichgültig, wo (Düse bzw. Vorbenetzung) die geringe Wassermenge in den Förderschlauch gespritzt wird.
Die Vorteile der Vorbenetzung liegen also normalerweise nicht in der Staubreduzierung (Ausnahme siehe (6)).

(3) Einfluß des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine auf die Feinstaubkonzentration
Eine Erhöhung des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine von z.B. 2 bar auf 3 bar verursacht einen Anstieg der Feinstaubkonzentration von ca. 240 %!
Dies konnte bei den atmosphärischen Kammerversuchen für

Eigenfeuchten der Ausgangsmischung von 1 % und 3 % festgestellt werden (s. Bild 3.2/5). Eine Vergrößerung des Förderdruckes ist - bei sonst unveränderten Ausgangsbedingungen - gleichbedeutend mit einem Anwachsen des Luftmengenbedarfes. Bei den hier vorliegenden Gegebenheiten erhöht sich der Luftbedarf im oben genannten Beispiel um fast 50 % (s. Bild 2.4/8). Dies führt im Bereich der Spritzdüse durch die entsprechend größere expandierende Luftmenge zu einer stärkeren Verwirbelung der Feinstaubanteile.

(4) Einfluß des verwendeten Spritzbetonmaschinentyps auf die Feinstaubkonzentration
Alternativ wurde beim Trockenspritzen anstelle der Spritzbetonmaschine Aliva 260 für einige Staubversuche in der Kammer die BSM GL 404 eingesetzt. Es konnten keine nennenswerten Unterschiede bei den ermittelten Feinstaubkonzentrationen im Spritzdüsenbereich festgestellt werden.

(5) Einfluß des Naßspritzverfahrens im Dünnstrom auf die Feinstaubkonzentration
Die Ergebnisse der mit der Naßspritzmaschine (Naßspritz-Verfahren in Dünnstrom) durchgeführten Staubmessungen in der Versuchskammer lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(a) Durch die Zugabe eines Klebers (Silipon SPR 6, Henkel, Zugabemenge 3°/$_{oo}$ des Zementgewichtes) in die Ausgangsmischung wird die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich um ca. 90 % vermindert (s. Bild 3.2/6). Die herkömmlichen Arbeitsbedingungen werden im Spritzdüsenbereich damit erheblich verbessert.

(b) Die Staubentwicklung ist auch abhängig vom W/Z-Faktor der Ausgangsmischung. Wird z.B. der W/Z-Faktor von 0,36 auf 0,4 erhöht, so konnte - trotz der sehr unterschiedlichen Absolutwerte (s. (a)) - ohne bzw. mit Kleberzugabe (Zugabemenge 3°/$_{oo}$ des Zementgewichtes) in die Ausgangsmischung

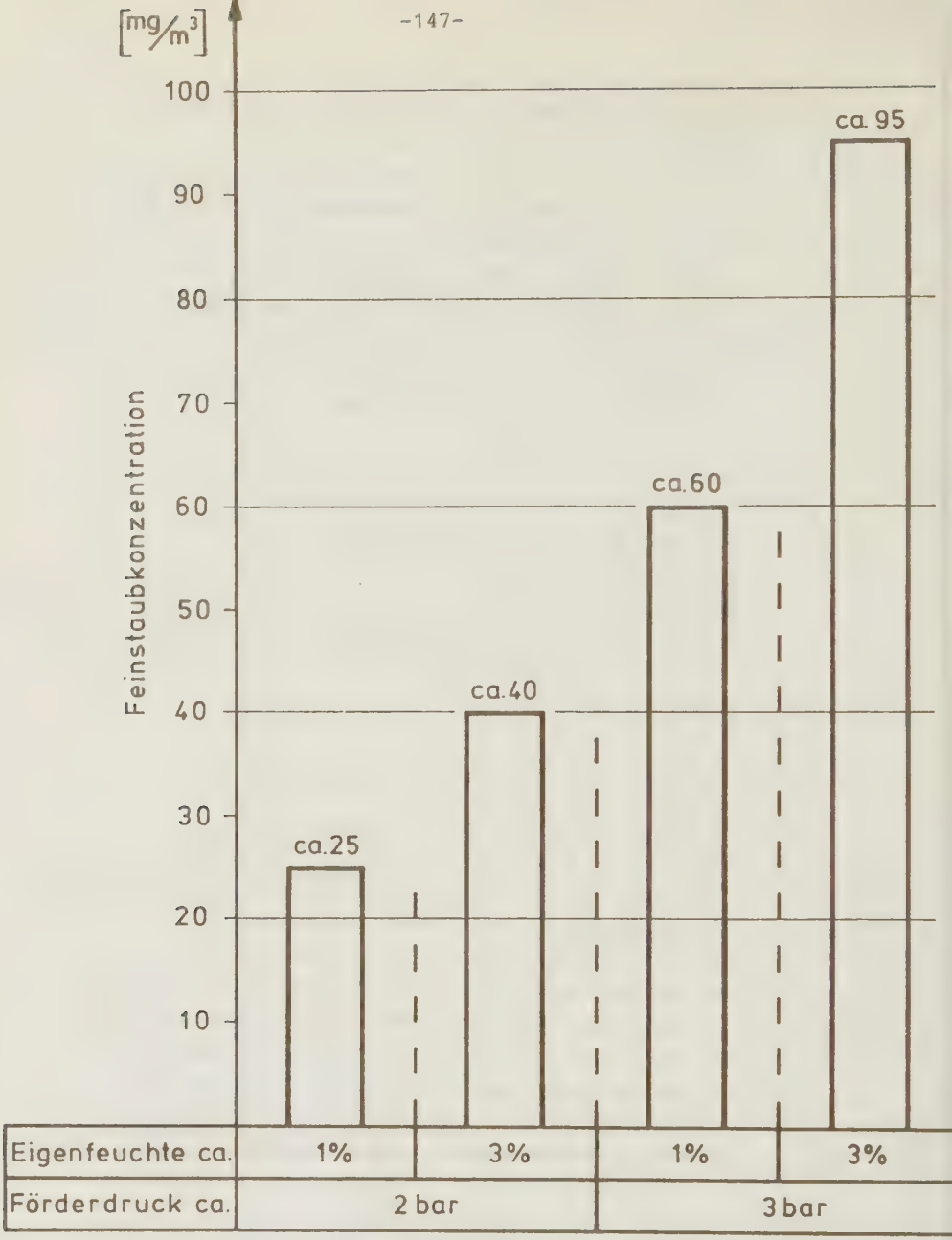


Bild 3.2/5: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und vom Förderdruck an der Spritzbetonmaschine. Die dargestellten Meßergebnisse wurden in der Versuchskammer bei atmosphärischem Luftdruck ermittelt. Die Wasserzugabe erfolgte durch eine Vorbenetzung.

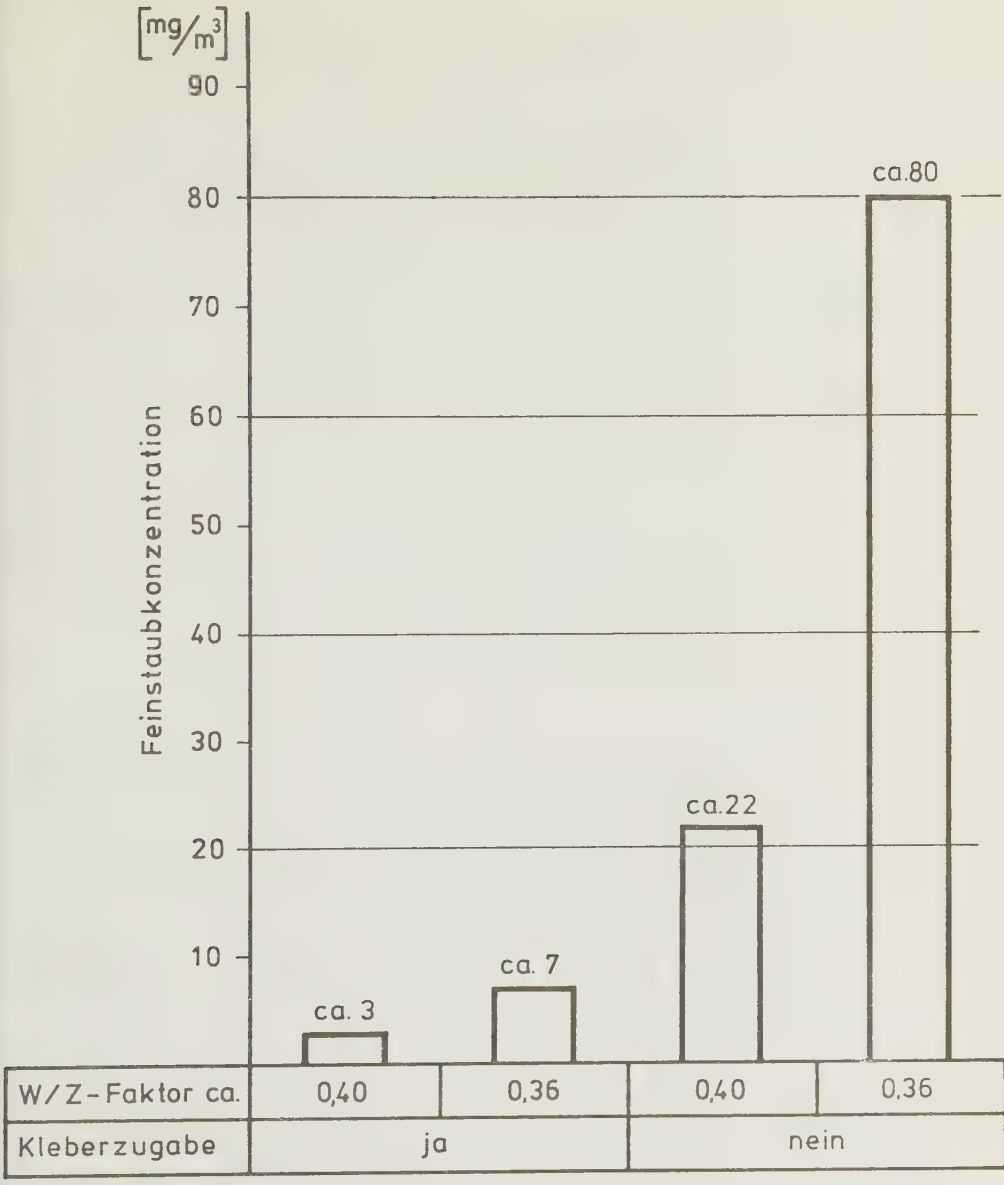


Bild 3.2/6: Feinstaubkonzentration beim Naßspritzverfahren (im Dünnstrom) in Abhängigkeit vom W/Z-Faktor und von der Kleberzugabe. Die dargestellten Meßergebnisse wurden in der Versuchskammer bei atmosphärischem Luftdruck ermittelt.

die Feinstaubkonzentration um ca. 70 % bzw. 60 % reduziert werden (s. Bild 3.2/6). Bei einem geringen W/Z-Faktor (≤ 0,36) und ohne Kleberzugabe sind von der Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich her gesehen keine nennenswerten Vorteile vom Naßspritz-Verfahren (im Dünnstrom) gegenüber dem Trockenspritz-Verfahren ohne Zusatzmittel zu erwarten. Ein W/Z-Faktor von 0,36 bzw. 0,4 entspricht bei den hier vorliegenden Verhältnissen einer Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 5,5 % bzw. 6 %. Vergleicht man die dazu entsprechenden Feinstaubkonzentrationen ohne Kleberzugabe in die Ausgangsmischung (s. Bild 3.2/6) mit den in Bild 3.2/3 dargestellten Werten beim Trockenspritz-Verfahren (Vorbenetzung),so wird der vermutete qualitative Verlauf der Feinstaubkonzentration (s. Bild 3.2/1) bestätigt. Der W/Z-Wert kann nicht beliebig erhöht werden, weil dann andere Nachteile z.B. Förderprobleme auftreten.

Da in der Bundesrepublik wesentlich mehr Trockenspritzmaschinen als Naßspritzmaschinen bei den Baufirmen vorhanden sind, wurde aus wirtschaftlichen Überlegungen geprüft, ob auch mit Hilfe einer herkömmlichen Rotor-Trockenspritzmaschine eine eigentliche für das Naßspritz-Verfahren in Dünnstrom übliche Ausgangsmischung mit einem W/Z-Faktor von 0,4 (dies entspricht einer Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 6 %) gefördert werden kann, um so die Vorteile des Naßspritz-Verfahrens (geringerer Staub bei Kleberzugabe, vgl. Bilder 3.2/3 und 3.2/6) zu nutzen. Die Versuche scheiterten. Das Naßspritz-Verfahren mit der Zugabe eines Klebers in die Ausgangsmischung erscheint hinsichtlich der gleichmäßig erzielbaren guten Betonqualität und der geringen Staubbildung im Spritzdüsenbereich für einen Einsatz Untertage besonders geeignet. Allerdings scheitert dies bisher neben baubetrieblichen Schwierigkeiten u. a. daran, daß die hohen erforderlichen Frühfestigkeiten, wie sie im innerstädtischen Verkehrstunnelbau benötigt werden, mit diesem Verfahren nicht erreicht werden (Probleme bei der BE-Mittel-Zugabe). Um diesen Mangel abzustellen,

wurden die in Kapitel 4 beschriebenen Versuche durchgeführt.

(6) Einfluß der Zusatzmittel beim Trockenspritz-Verfahren auf die Feinstaubkonzentration.

(a) Kleber (Silipon SPR 6)

Nach Angaben des Herstellers benötigt der Kleber eine gewisse Reaktionszeit mit dem Wasser, um voll wirken zu können. Deshalb wurde bisher der Kleber auch nur als Zusatzmittel für Betonmischungen verwendet, denen das gesamte Wasser bereits im Mischer zugegeben wird, wie z.B. beim Naßspritz-Verfahren.

Außerdem ist die Kleber-Zugabemenge äußerst gering (ca. 1 kg/m³), so daß auch eine gleichmäßige Verteilung in einer relativ trockenen Ausgangsmischung angezweifelt wurde. Die Aussichten, den Kleber beim Trockenspritzverfahren erfolgreich einzusetzen, waren also gering. Trotzdem wurde der Kleber, (Zugabemenge 3°/₀₀des Zementgewichtes) bei den Staubmessungen im Versuchsstollen einer üblichen Ausgangsmischung für das Trockenspritzverfahren (Eigenfeuchte 3 %) zugegeben. Die Meßergebnisse sind in Bild 3.2/7 dargestellt. Danach wird die Feinstaubkonzentration durch die Kleberzugabe in die Ausgangsmischung bei der Wasserzugabe an der Düse bzw. Vorbenetzung um ca. 25 % bzw. 95 % vermindert. Da der Kleber einige Zeit zum Reagieren mit dem Wasser braucht, wirkt sich hier eine Vorbenetzung sehr günstig aus.

In weiteren Versuchen in Duisburg (Baulos 6/7) wurde dann das Zusammenwirken des Klebers mit BE-Mitteln näher untersucht (Tabelle 3.2/3 und Bilder 3.2/8 bis 3.2/11).

Die dortigen Ergebnisse der Messungen der Feinstaubkonzentrationen im Spritzdüsenbereich lassen sich wie folgt zusammenfassen:

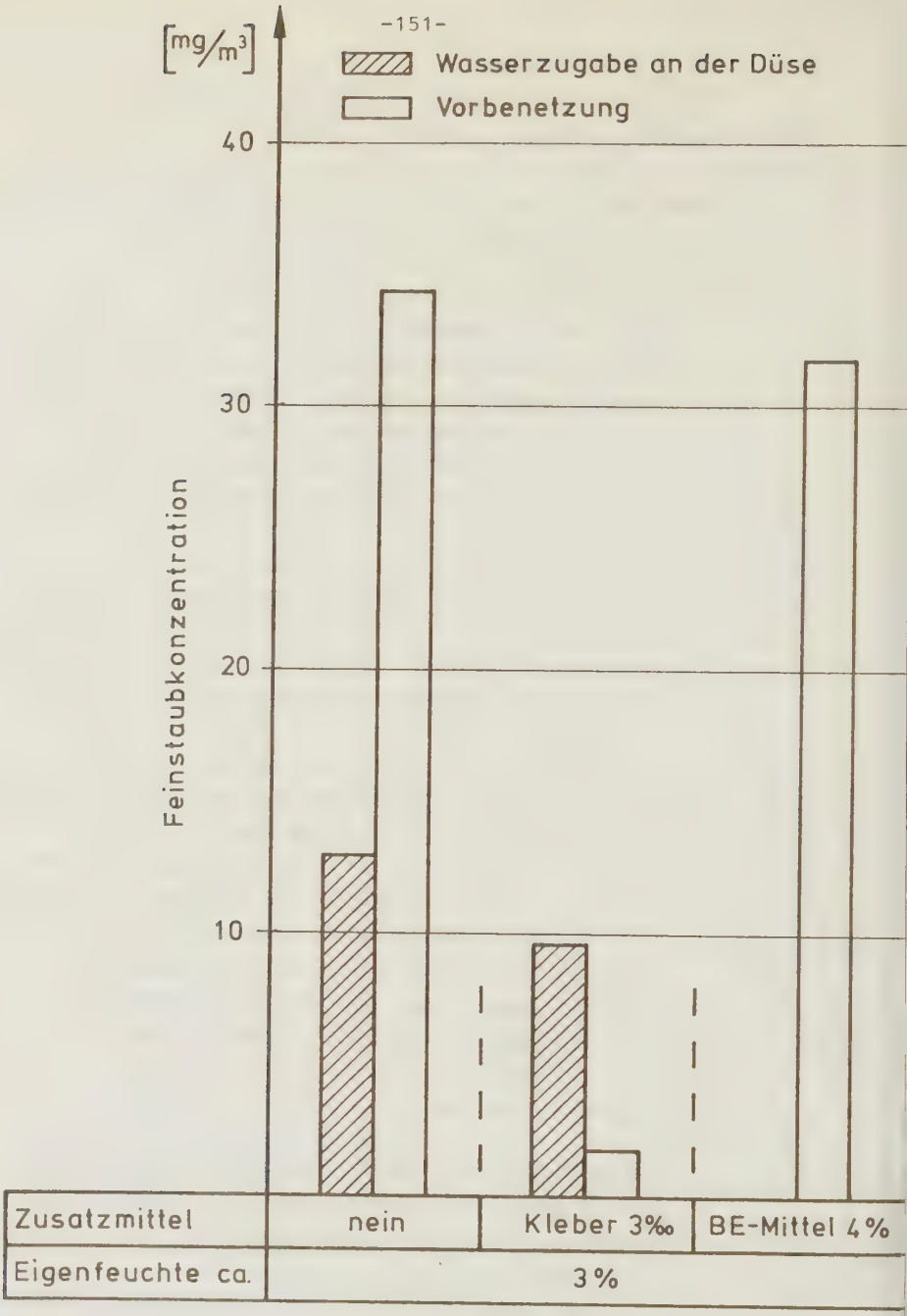


Bild 3.2/7: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit vom Betonzusatzmittel (Kleber: Silipon SPR 6; BE-Mittel: VP8030 flüssig von Meynadier) und vom Ort der Wasserzugabe. Die dargestellten Meßergebnisse wurden in einem Versuchsstollen in Winterthur (Schweiz) ermittelt.

- Bei Verwendung eines Hochofenzementes und der Wasserzugabe durch eine Vorbenetzung (s. Bild 3.2/8):

  Bei einer Kleberzugabe von 1,5 %₀ bzw. 3 %₀ wird bei Verwendung eines BE-Mittels die Feinstaubkonzentration um ca. 55 % bzw. 75 % reduziert. Dieses Ergebnis erscheint insbesondere im Hinblick auf einen möglichst geringen Kostenaufwand interessant, da 1 kg Silipon SPR 6 etwa DM 15,-- kostet (Stand 1981).

  Ein Vergleich der Meßergebnisse mit 1,5 %₀ Kleberzugabe und ohne bzw. mit BE-Mittel-Zugabe zeigt daß durch das verwendete BE-Mittel die Feinstaubkonzentration um ca. 55 % erhöht wird. Dieses BE-Mittel wirkt also in diesem ganz speziellen Fall im Hinblick auf die Staubentwicklung nicht optimal mit dem Silipon zusammen.

- Bei Verwendung eines Portlandzementes und der Wasserzugabe an der Düse (s. Bild 3.2/9):

  Die Feinstaubkonzentration konnte hier ohne bzw. mit BE-Mittel-Zugabe durch die Kleberzugabe um ca. 70 % bzw. 65 % reduziert werden. Dieses Ergebnis zeigt, daß auch bei der Wasserzugabe an der Düse eine gute Verminderung der Feinstaubkonzentration erzielt werden kann.

Die Überprüfung der Spritzbetondruckfestigkeit bei einer Siliponzugabe ergab:

- Bei Verwendung eines Hochofenzementes (s. Bild 3.2/10):

  Die Spritzbetondruckfestigkeit wird insbesondere im jungen Alter durch die Siliponzugabe auch bei Verwendung eines BE-Mittels reduziert. Die Druckfestigkeitsminderung durch die Siliponzugabe beträgt z.B. im Alter von 8 Stunden fast 50 % (s. Bild 3.2/10).

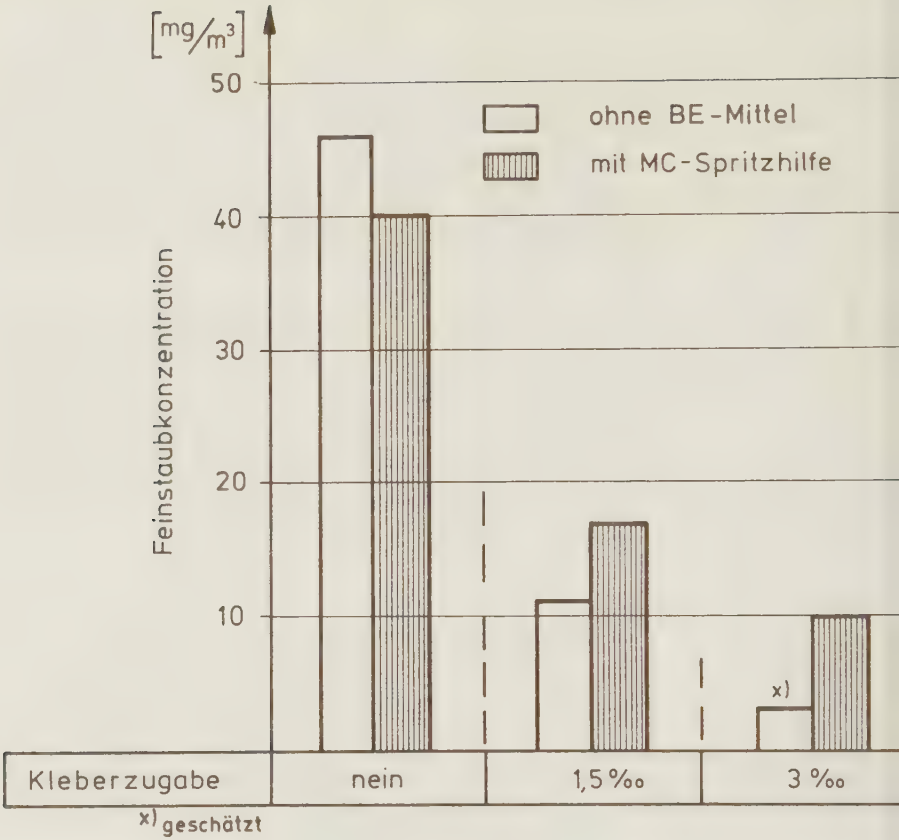


Bild 3.2/8: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Kleberzugabemenge und von der Verwendung eines BE-Mittels (Zugabemenge ca. 4 % des Zementgewichtes). Die dargestellten Meßergebnisse wurden in einem Versuchsraum auf dem Baulos 6/7 in Duisburg ermittelt. Es wurde ein Hochofenzement (HOZ) verwendet. Die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung betrug ca. 3 %. Die Wasserzugabe erfolgte durch eine Vorbenetzung.

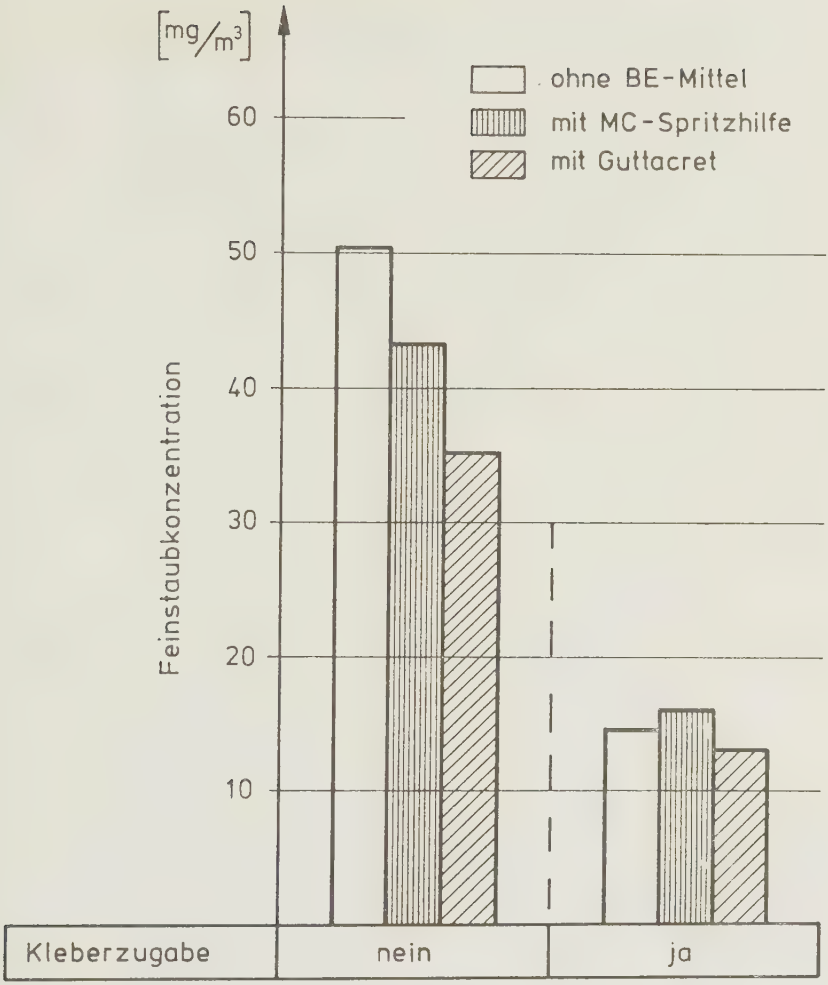


Bild 3.2/9: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Kleberzugabe (Zugabemenge: 3 °/₀₀ des Zementgewichtes) und vom BE-Mittel (Zugabemenge: 4 % des Zementgewichtes). Die dargestellten Meßergebnisse wurden in einem Versuchsraum auf dem Baulos 6/7 in Duisburg ermittelt. Es wurde ein Portlandzement verwendet. Die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung betrug ca. 3 %. Die Wasserzugabe erfolgte an der Spritzdüse.

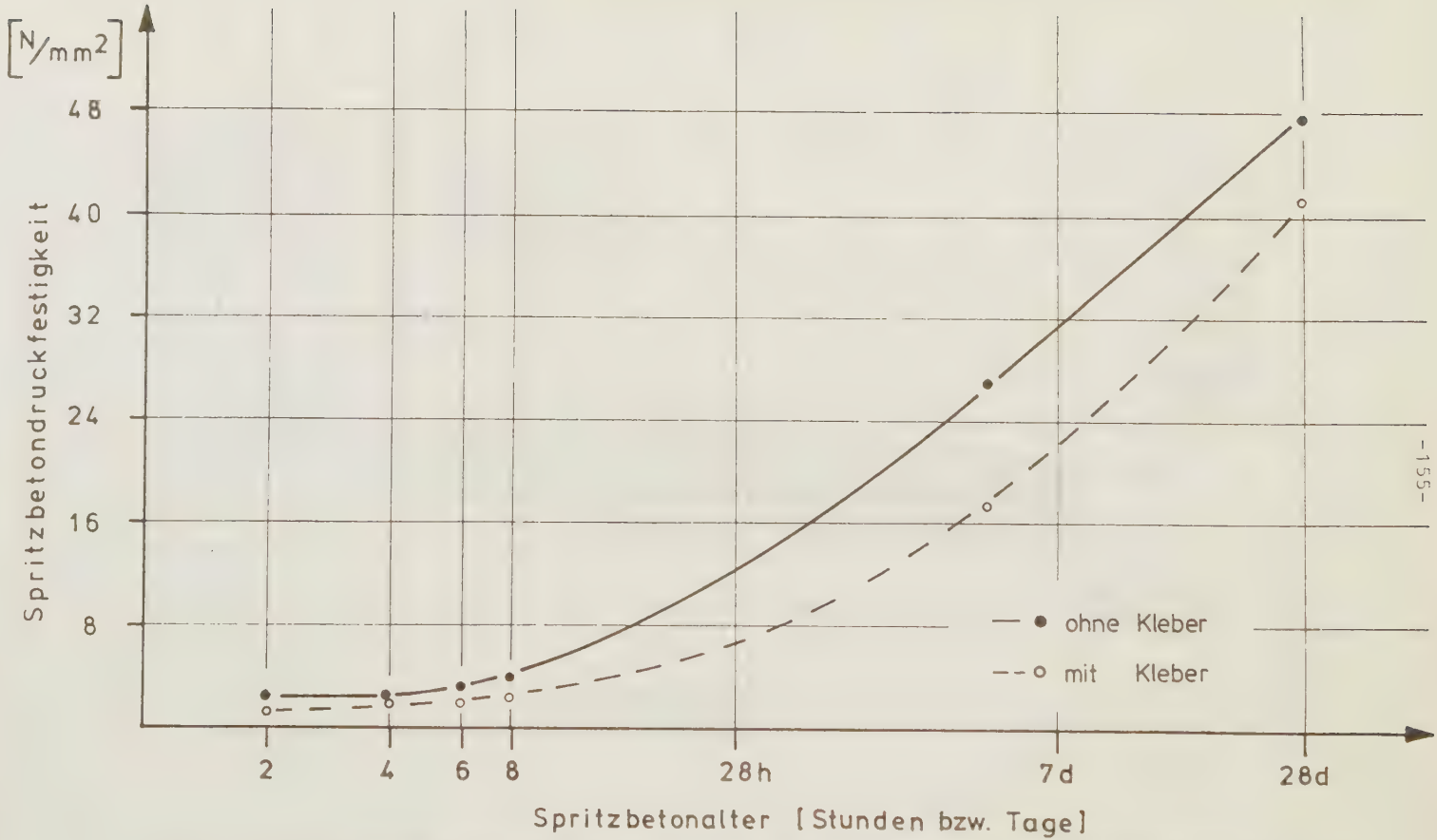


Bild 3.2/10: Druckfestigkeit des im Trockenspritz-Verfahren hergestellten Spritzbetons in Abhängigkeit von der Kleberzugabe und vom Spritzbetonalter.
Es wurde ein Hochofenzement (HOZ 35 L) verwendet und ein BE-Mittel (MC-Spritzhilfe; Zugabemenge ca. 4 % des Zementgewichtes) zugegeben.

Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen wird hingegen nur um ca. 15 % vermindert (s. Bild 3.2/10).

In einigen begleitenden Tastversuchen konnte festgestellt werden, daß sich die Standzeit der Spritzbetonausgangsmischung mit Silipon SPR 6 bis zu ca. 4 Stunden im Hinblick auf den Druckfestigkeitsverlauf und die Verarbeitung (Förderung) nicht negativ auswirkt (längere Standzeiten wurden nicht untersucht).

- Bei Verwendung eines Portlandzementes (s. Bild 3.2/11):

  Auch hier wird durch die Siliponzugabe die Spritzbetondruckfestigkeit reduziert (s. Bild 3.2/11). Die Druckfestigkeitsminderung beträgt z.B. im Alter von 8 Stunden

  . ohne BE-Mittel-Zugabe ca. 80 %
  . mit Zugabe von MC-Spritzhilfe ca. 60 % und
  . mit Zugabe von Guttacret nur ca. 15 %.

  Das jeweils verwendete BE-Mittel-Fabrikat hat also einen erheblichen Einfluß auf den Druckfestigkeitsverlauf. Die Druckfestigkeit des Spritzbetons im Alter von 8 Stunden ist ohne Kleberzugabe bei der Verwendung von MC-Spritzhilfe um ca. 20 % besser als bei der Verwendung von Guttacret. Dies zeigt, daß nicht das bessere Zusammenwirken des BE-Mittels mit dem Zement für die richtige Wahl des BE-Mittels maßgebend ist, sondern die verträgliche Reaktion mit dem Silipon SPR 6. Die Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen gehen aus Bild 3.2/11 hervor. Die größte bzw. geringste Druckfestigkeitsabnahme nach 28 Tagen durch die Siliponzugabe betrug ca. 15 % (ohne BE-Mittel und mit Zugabe von Guttacret) bzw. ca. 5 % (mit Zugabe von MC-Spritzhilfe). Es konnte jedoch in allen Fällen eine nach DIN 18551 untersuchte Serienfestigkeit von 30 N/mm² erreicht werden.

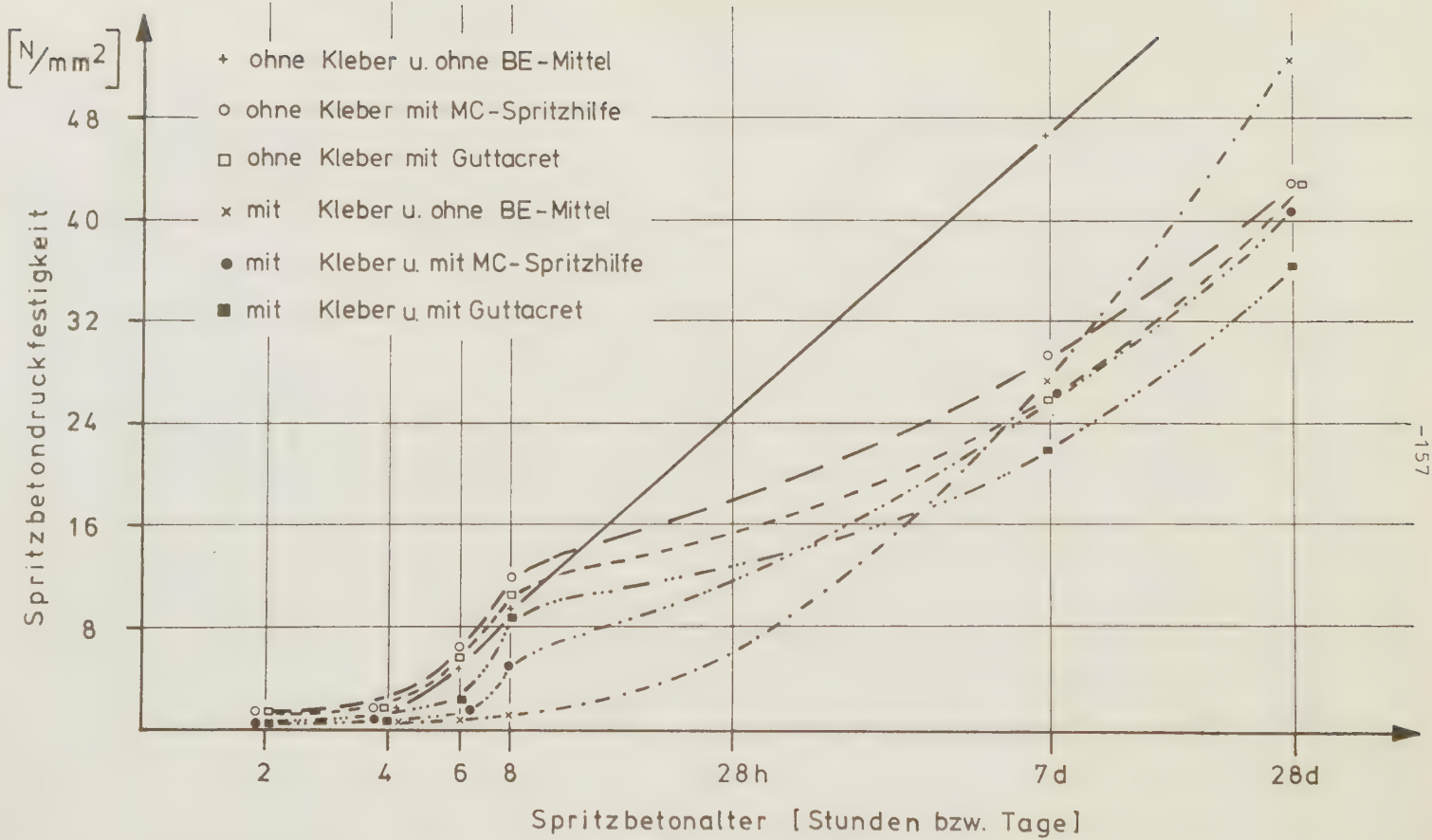


Bild 3.2/11: Druckfestigkeit des im Trockenspritz-Verfahren hergestellten Spritzbetons in Abhängigkeit von der Kleberzugabe, vom verwendeten BE-Mittel und vom Spritzbetonalter. Es wurde ein Portlandzement (PZ 35 F) verwendet.

Das Trockenspritz-Verfahren in Verbindung mit einer Kleberzugabe vermindert also ganz erheblich die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich. Die staubmindernde Wirkung des Klebers kann durch eine Vorbenetzung noch weiter gesteigert werden.

(b) BE-Mittel

Ob durch die Zugabe von BE-Mitteln beim Trockenspritzverfahren die Staubbelastung im Spritzdüsenbereich reduziert werden kann, hängt vom jeweils verwendeten BE-Mittel und seinen Eigenschaften ab. Diese Frage kann also nicht allgemein beantwortet werden. Deshalb gelten die hier angegebenen Versuchsergebnisse auch nur für die eingesetzten BE-Mittel (s. Anmerkungen in den Bildunterschriften).

Prinzipiell ist eine Staubreduzierung durch ein geeignetes BE-Mittel möglich. So zeigen z. B. die in Bild 3.2/9 dargestellten Meßergebnisse, daß durch die Zugabe von Guttacret die Feinstaubkonzentration um ca. 30 % gesenkt werden konnte. Bei anderen Ausgangsbedingungen wirkt eine BE-Mittel-Zugabe nur in geringem Maße staubreduzierend (s. Bilder 3.2/7 und 3.2/8).

Aus Bild 3.2/12 ist deutlich ersichtlich, daß auch die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung einen Einfluß auf die staubvermindernde Wirkung eines BE-Mittels haben kann. So konnte die Feinstaubkonzentration durch die Zugabe eines BE-Mittels bei einer Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 2 % bzw. ca. 1 % überhaupt nicht bzw. um ca. 20 % gesenkt werden.

Nach Angaben der BE-Mittel-Hersteller reagieren die Schnellbinder sehr stark mit dem Wasser und sollen auch eine gewisse Klebewirkung besitzen, die bei ausreichender Reaktionszeit bzw. Wassermenge optimal zur Wirkung kommt. Da bei geringen Eigenfeuch-

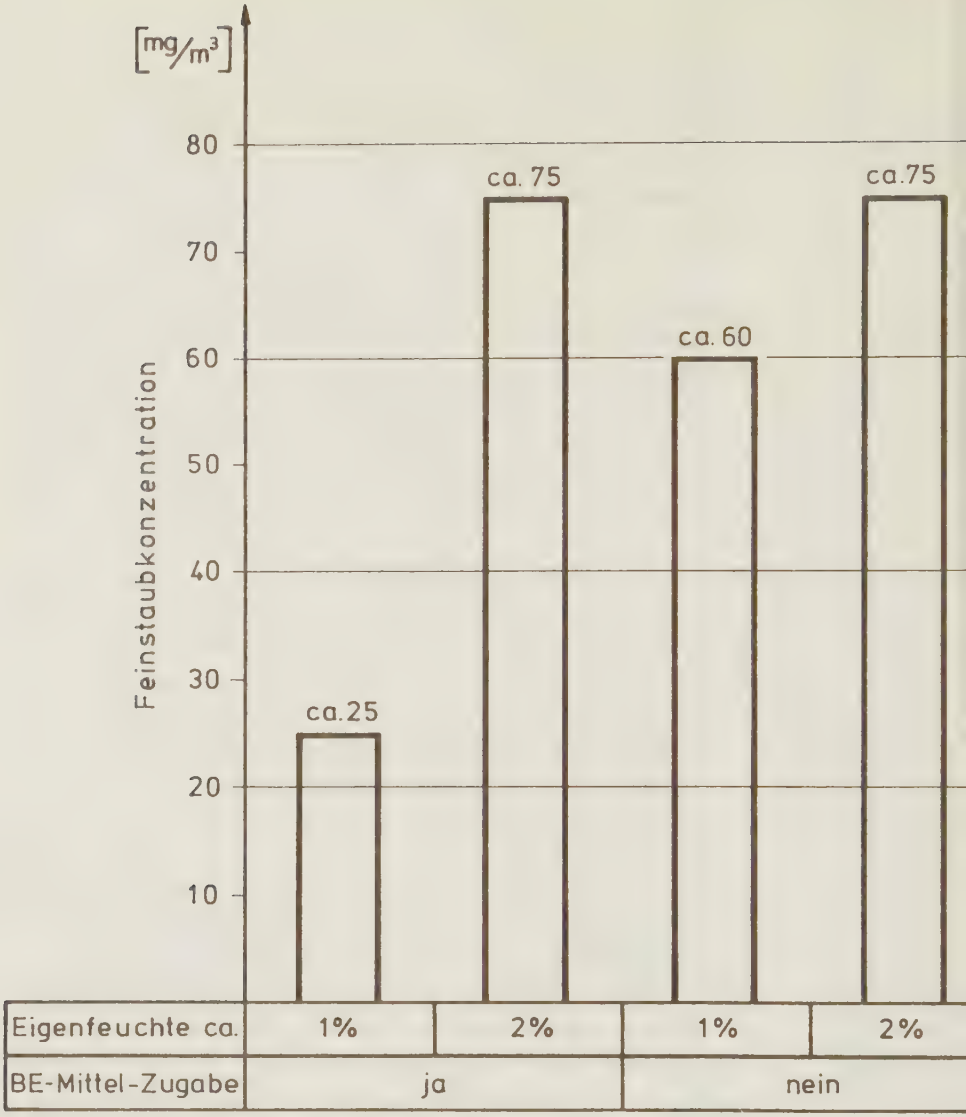


Bild 3.2/12: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und der BE-Mittel-Zugabe (MC-Spritzhilfe; Zugabemenge ca. 4 % des Zementgewichtes). Die dargestellten Meßergebnisse wurden in der Versuchskammer bei atmosphärischem Luftdruck ermittelt. Die Wasserzugabe erfolgte durch eine Vorbenetzung.

ten der Ausgangsmischung relativ viel Wasser zugegeben werden muß (Bild 2.2/2), begünstigt dieses große Wasserangebot wahrscheinlich die Verminderung der Feinstaubkonzentration durch eine BE-Mittel-Zugabe.

(7) Einfluß des Umgebungs-Luftüberdruckes auf die Feinstaubkonzentration
Die Staubmessungen in Druckluft in der Versuchskammer haben bei den vorliegenden Ausgangsbedingungen (s. Kapitel 2.2 und 3.1) folgendes ergeben:

(a) Mit größer werdender Eigenfeuchte der Ausgangsmischung (im Bereich von ca. 1 % bis 4 %) erhöht sich - wie auch bei den Staubversuchen in der Atmosphäre - die Staubentwicklung (Begründung siehe (1)) im Spritzdüsenbereich (s. Bild 3.2/13). Die Feinstaubkonzentration steigt im untersuchten Bereich um ca. 10 mg/m³ bei einer Zunahme der Eigenfeuchte um 1 %.

(b) Eine Vorbenetzungseinrichtung beim Trockenspritzverfahren bringt keine Staubreduzierung gegenüber der Wasserzugabe an der Düse. Die Feinstaubkonzentrationen sind in beiden Fällen etwa gleich (s. Bild 3.2/13).

(c) Eine Erhöhung des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine von z.B. 5 bar auf 6 bar bei einem Kammerüberdruck von 2 bar ergab einen Anstieg der Feinstaubkonzentration von ca. 40 %. Dies konnte für eine Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 2,5 % festgestellt werden. Eine Vergrößerung des Förderdruckes ist - bei sonst unveränderten Ausgangsbedingungen - gleichbedeutend mit einer Zunahme der ausströmenden Luftmenge an der Spritzdüse. Bei den vorliegenden Gegebenheiten erhöhte sich die komprimierte, ausströmende Luftmenge im oben genannten Beispiel um ca. 20 %.

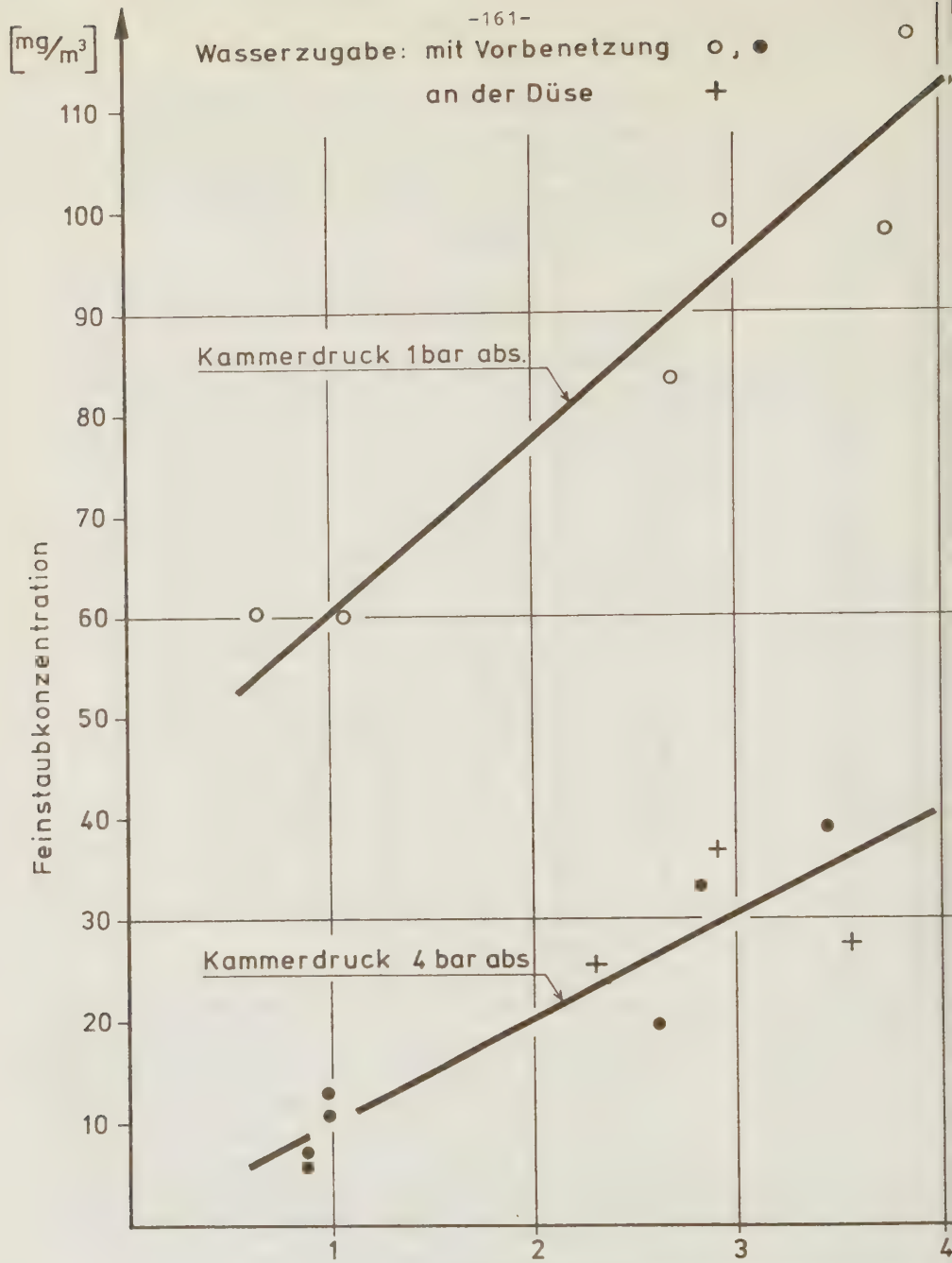


Bild 3.2/13: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit vom Kammerüberdruck, von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und vom Ort der Wasserzugabe.

Dies führt zu einer stärkeren Verwirbelung der Feinstanteile im Spritzdüsenbereich und damit zu einer größeren Feinstaubkonzentration.

(d) Die Feinstaubkonzentration ist in Druckluft geringer als bei atmosphärischem Luftdruck (Ausgangsbedingungen s. Kapitel 2.2, 2.4).
Die durchgeführten Versuche zeigten, daß bei vergleichsweise gleichem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine die bei 0 bar gegenüber 1 bar Kammerüberdruck gemessene Feinstaubkonzentration etwa doppelt so groß war (s. Bild 3.2/14). Die im Überdruckbereich gemessenen Feinstaubkonzentrationen nehmen mit größer werdendem Kammerinnendruck ab.
Die Erklärung hierfür ist in der an der Spritzdüse ausströmenden Luftmenge zu sehen (s. Bild 3.2/15). Das folgende Beispiel soll dies näher erläutern:
Die erforderliche Ansaugluftmenge des Kompressors beträgt bei den Spritzbetonversuchen mit 0 bar bzw. 3 bar Kammerüberdruck und entsprechend eingestelltem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine (s. Kapitel 2.4.1) ca. 10 m^3/min bzw. 19 m^3/min (s. Bild 2.4/8). An der Spritzdüse treten dann 10 m^3/min bzw. 1/4 . 19 m^3/min ($\sim$ 5 m^3/min) Luft unter dem jeweiligen Umgebungsdruck (Kammerdruck 1 bar absolut bzw. 4 bar absolut) aus. Bei atmosphärischem Luftdruck (1 bar absolut) in der Versuchskammer strömt in diesem Beispiel etwa die doppelte Luftmenge an der Düse gegenüber der unter 3 bar Überdruck stehenden Kammer aus. Die zugehörige Feinstaubkonzentration erhöht sich um ca. 50 mg/m^3 (von ca. 25 mg/m^3 auf 75 mg/m^3, s. Bild 3.2/15). Die Zunahme von nur 1 m^3/min Austrittsluftmenge erhöht bereits bei den vorliegenden Verhältnissen die Feinstaubkonzentration um ca. 10 mg/m^3! Ziel

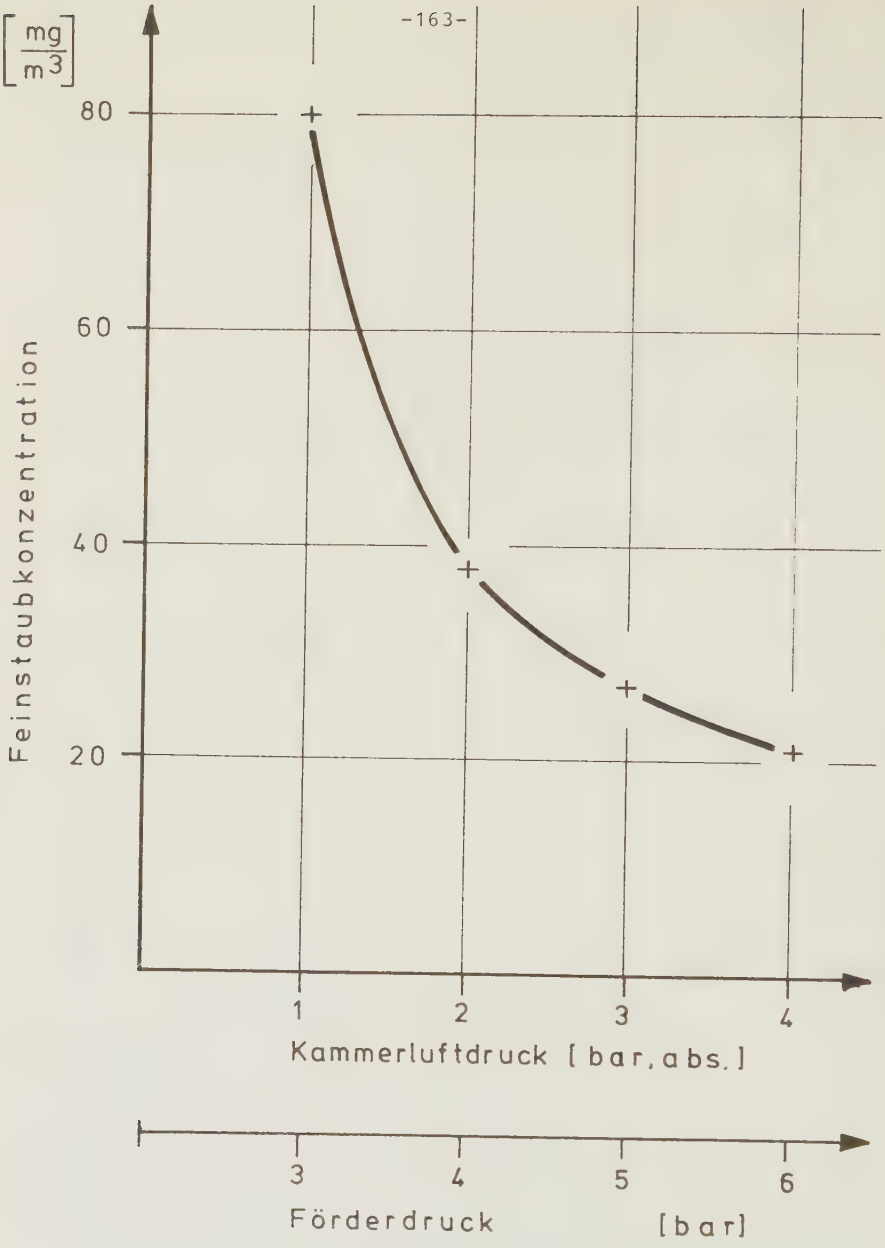


Bild 3.2/14: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit vom Kammerüberdruck bei vergleichsweise gleichem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine (s. Kapitel 2.4.1). Die Wasserzugabe erfolgte durch eine Vorbenetzung und die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung betrug ca. 2,5 %.

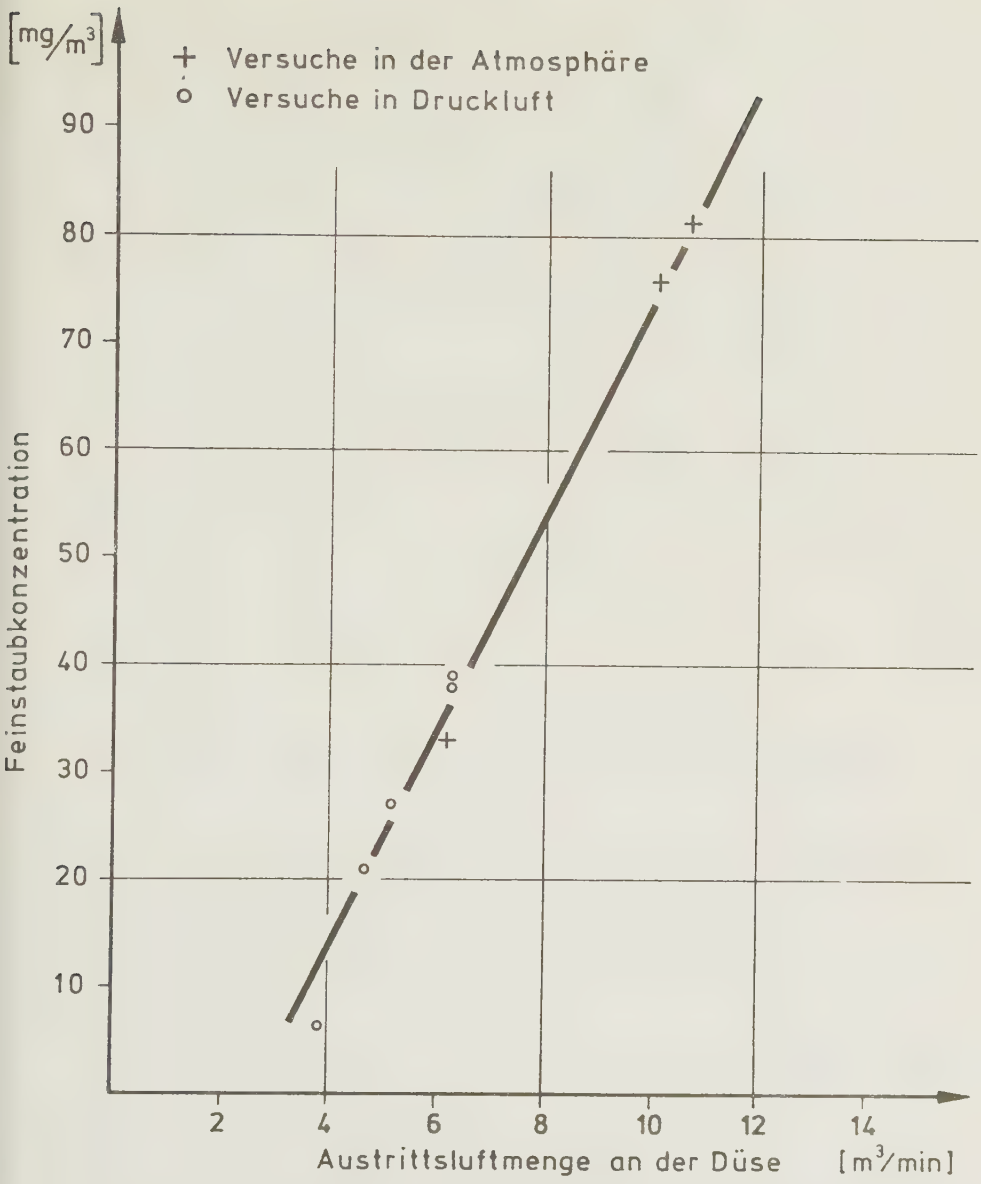


Bild 3.2/15: Feinstaubkonzentration beim Trockenspritz-Verfahren in Abhängigkeit von der Austrittsluftmenge an der Spritzdüse. Die Wasserzugabe erfolgte durch eine Vorbenetzung und die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung betrug ca. 2,5 %.

sollte es deshalb ganz allgemein beim Trockenspritz-Verfahren sein, nicht nur wegen des geringen Energieverbrauches und Rückpralls, sondern auch im Hinblick auf bessere Arbeitsbedingungen im Spritzdüsenbereich, den Luftverbrauch auf das geringst notwendige Maß zu beschränken.

4 Versuche zur Erhöhung der Frühfestigkeit des Spritzbetons beim Naßspritz-Verfahren im Dünnstrom

4.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der durchgeführten Staubversuche (s.Kapitel 3) haben gezeigt, daß beim Naßspritzen (im Dünnstrom) mit der Zugabe eines Klebers in die Ausgangsmischung der Staub an der Spritzdüse erheblich reduziert wird (s. Bild 3.2/6). Bei Verwendung einer üblichen Spritzbetonausgangsmischung (z.B. Zementgüte PZ 35 F) und ohne BE-Mittelzugabe konnnte jedoch die beim innerstädtischen Verkehrstunnelbau geforderte Frühdruckfestigkeit (in München z.B. sechs Stunden nach dem Spritzen 5 N/mm²) nicht erreicht werden. Ziel war es deshalb, die Spritzbetonfrühfestigkeit bei diesem wenig Staub verursachenden Spritz-Verfahren durch geeignete Maßnahmen zu erhöhen. Dazu wurden zahlreiche Versuche durchgeführt, die den Charakter von Tastversuchen haben und folglich eine vornehmlich qualitative Aussage liefern sollten.

Folgende Fragen standen dabei im Vordergrund:

a) Welchen Einfluß hat die Zementgüte auf die Frühdruckfestigkeitsentwicklung?

b) Kann ein flüssiges BE-Mittel gleichmäßig im Spritzbeton verteilt werden unter gleichzeitiger Verwendung eines speziellen Klebers?

c) An welcher Stelle läßt sich das BE-Mittel optimal in den Spritzbetonförderstrom geben?

d) Wie groß sind die Früh- und 28-Tage-Druckfestigkeiten des Spritzbetons bei der Zugabe eines flüssigen BE-Mittels?

e) Hat die Verwendung des staubreduzierenden Klebers negative Auswirkungen auf die Spritzbetondruckfestigkeit, wenn ein Schnellzement bzw. ein flüssiges BE-Mittel verwendet wird?

f) Ist auch die Zugabe einer flüssigen Kombination Kleber/BE-Mittel möglich?

Die verwendete Spritzbetonausgangsmischung bestand aus:

- Zement: 350 kg/m³
- Kleber (Silipon SPR6): 3°/$_{oo}$ [1] vom Zementgewicht
- Zuschlag: Sieblinie B_{16}
- Wasser: W/Z-Wert ca. 0,4

Zement, Kleber, Zuschlag und Wasser wurden in einem Zwangsmischer ca. 1,5 min lang gemischt und anschließend in die Spritzbetonmaschine, Typ 208G-E der Firma Sperno, Neckarzimmern, gegeben. Für die Zugabe der flüssigen Betonzusatzmittel wurde eine von der Firma Sperno neu entwickelte Dosiereinrichtung eingesetzt.
Folgende Prüfungen wurden am Spritzbeton vorgenommen:

- die Frühfestigkeit nach 2 h, 4 h, 6 h und 8 h - ermittelt mit Hilfe des Kaindl-Meyco-Gerätes, und

- die Druckfestigkeit nach ca. 28 h und 28 d - an Hand von Bohrkernen (Ø = 100 mm)

4.2 Versuchsergebnisse und Schlußfolgerungen

Im nachfolgenden werden die wesentlichsten Ergebnisse der Naßspritz-Versuche aufgeführt:

(a) Der Druckfestigkeitsverlauf des Spritzbetons in Abhängigkeit von den untersuchten Zementen geht direkt aus Bild 4.2/1 hervor. Folgende Zemente wurden eingesetzt:

- PZ 35 F der Firma Schwenk, Allmendingen,
- PZ 45 F der Firma Heidelberger Zement, Kiefersfelden
- PZ 55 der Firma Heidelberger Zement, Kiefersfelden

und

- Z 35 SF Schnellzement der Firma Ardex, Witten.

Der Ausgangsmischung bei diesen Versuchen wurde stets

---

[1] Der Kleber (Silipon SPR6) wurde bei dem Versuch mit der Zugabe einer flüssigen Kombination Kleber/BE-Mittel der Ausgangsmischung nicht zugegeben.

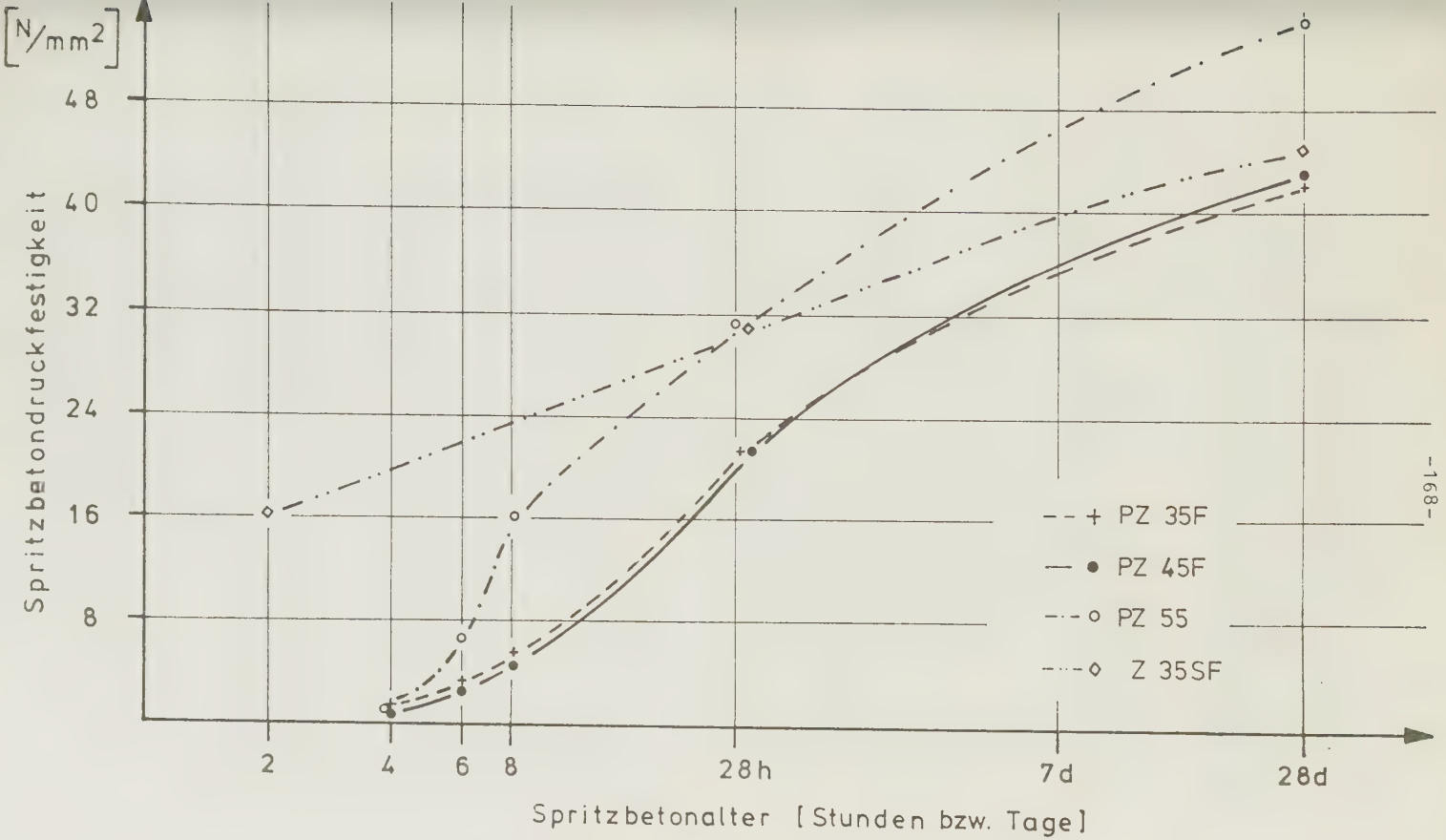


Bild 4.2/1: Druckfestigkeit des Spritzbetons in Abhängigkeit von der Zementart und vom Spritzbetonalter. Der Ausgangsmischung wurde ein spezieller Kleber zugegeben. Die Druckfestigkeit bis zu einem Spritzbetonalter von 8 h wurde mit Hilfe des Kaindl-Meyco-Gerätes [36] , die der älteren Proben anhand von Bohrkernen (Ø = 10 cm, h/d = 1) ermittelt.

Silipon SPR 6 (Kleber) zugegeben. Dies war erforderlich, da ohne Schnellbinderzugabe nur mit dem Kleber problemlos ausreichend starke Auftragsschichten erreicht werden können, und außerdem die Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich erheblich reduziert wird (s. Bild 3.2/6).

Bei der Beurteilung der erzielten Spritzbetonfestigkeiten muß jedoch beachtet werden, daß durch die Kleberzugabe die Festigkeitsentwicklung insbesondere des jungen Betons verzögert wird (s. Bilder 3.2/10 und 3.2/11).

Im einzelnen kann festgestellt werden:

- Eine ausreichende Frühdruckfestigkeit des Spritzbetons mit Kleberzugabe ist in den ersten Minuten (ca. 180 min) nach dem Spritzen mit allen untersuchten Normalzementen nicht zu erreichen (s. Bild 4.2/1). Die Druckfestigkeit der Spritzbetone mit dem PZ 55 lag zwar sechs Stunden nach dem Spritzen über den von der Stadt München geforderten 5 N/mm², eine Verwendung dieses Zementes mit Kleberzugabe ist jedoch nur möglich, wenn praktisch keine Festigkeit des Spritzbetons in den ersten ca. 3 Stunden nach dem Spritzen verlangt wird. Zu berücksichtigen ist außerdem, daß die Verwendung eines PZ 55 im Vergleich zu einem PZ 35 F mit BE-Mittel u.U. preiswerter sein kann.

- Es konnte eine nach DIN 18551 untersuchte Serienfestigkeit von 30 N/mm² mit allen untersuchten Zementen mit Kleberzugabe erreicht werden (s. Bild 4.2/1).

- Der Spritzbeton, der mit dem Wittener Schnellzement und mit Kleberzugabe hergestellt wurde, erreichte zwar sicher die geforderte Frühfestigkeit, seine Verwendung im Spritzbetonbau erscheint jedoch aus folgenden Gründen z.Z. nicht möglich:

  . Die relativ kurze Verarbeitungszeit von ca. 30 Minuten kann beim Naßspritzen unter Baustellenbedingungen nur schwer eingehalten werden

. Eine Zulassung des untersuchten Schnellzementes liegt z.Z. nur für Sanierungsmaßnahmen von Bauteilen aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton mit nachträglichem Verbund vor. Die Zulassung müßte auch auf die Neuherstellung von Bauvorhaben erweitert werden.

Auch der hohe Preis des Wittener Schnellzementes Z 35 SF wirkt z. Zt. noch hindernd auf einen Einsatz dieses Zementes. Andererseits hat die Verwendung eines Schnellzementes auch Vorteile gegenüber einem normalen Zement (PZ 35 F) mit einer BE-Mittel-Zugabe. Zu diesen zählen: Fortfall der BE-Mitteldosierungsprobleme, gleichmäßige Betonqualität und hohe Endfestigkeit. Ein Schnellzement wird - wenn überhaupt - vorteilhafter beim Trockenspritz-Verfahren eingesetzt, da hier die Probleme, die mit der sehr kurzen Verarbeitungszeit zusammenhängen, nicht eine so große Rolle spielen wie beim Naßspritz-Verfahren.

(b) Die Dosiereinrichtung für die Zugabe flüssiger BE-Mittel hat sich prinzipiell bewährt. Die Verteilung des flüssigen BE-Mittels im aufgetragenen Spritzbeton war - wie die geringe Festigkeitsstreuung der gewonnenen Kaindl-Meyco-Bolzen gezeigt hat - gut. Mit der eingesetzten Dosiereinrichtung konnte außerdem die eingestellte Dosiermenge von ca. 4 % des Zementgewichtes über die gesamte Versuchszeit relativ genau eingehalten werden. Einzelne Teile der Dosiereinrichtung müssen jedoch für einen Baustelleneinsatz z.Z. noch robuster ausgelegt werden. Die Dosiereinrichtung wurde bei den durchgeführten Versuchen unmittelbar hinter der Spritzbetonmaschine installiert. Der Vorteil dieser Anordnung ist darin zu sehen, daß die gesamte Förderschlauchlänge als Durchmischungsstrecke zur Verfügung steht, und die Dosiereinrichtung geschützt ist sowie vom Maschinenführer kontrolliert werden kann. Allerdings ist beim Auftreten eines Verstopfers nachteilig, daß ein Teil des Förderschlauches zubetoniert wird,

wenn ein sehr rasch wirkendes BE-Mittel verwendet wird. Die Zugabe des flüssigen BE-Mittels direkt an der Spritzdüse wurde nicht erprobt. Wird bei einer solchen Anordnung jedoch die bei den Versuchen zur Verfügung stehende Dosiereinrichtung verwendet, so ist ein größerer Aufwand zum Schutz der Dosiereinrichtung und zur gleichmäßigen Verteilung des BE-Mittels im Spritzbeton erforderlich. Nachteilig ist außerdem dann das große Gewicht der Spritzdüse.

(c) Die erzielten Spritzbetondruckfestigkeiten bei der Verwendung eines PZ 35 F, eines Klebers (Zugabemenge 3°/$_{oo}$ des Zementgewichtes) und der untersuchten flüssigen BE-Mittel (Zugabemenge ca. 4 % des Zementgewichtes) sind direkt Bild 4.2/2 zu entnehmen.

Da die flüssigen BE-Mittel i.a. Wasser enthalten (Silirit z.B. ca. 70 %), wurde bei den ersten Versuchen das hierin befindliche Wasser von der rechnerisch ermittelten Wasserzugabemenge in Abzug gebracht. Der aufgetragene Spritzbeton erwies sich jedoch in diesen Fällen als geringfügig zu trocken, so daß bei späteren Versuchen das im unverdünnten BE-Mittel enthaltene Wasser bei der Wasserzugabe nicht mehr berücksichtigt wurde. Die flüssigen BE-Mittel wurden mit Wasser im Mischungsverhältnis 1 : 1 verdünnt in den Förderstrom dosiert. Diese Wassermenge und das im feuchten Zuschlag enthaltene Wasser wurden bei der Wasserzugabe im Zwangsmischer in Abzug gebracht, um den vorgeschriebenen W/Z-Wert von 0,4 einzuhalten. Im einzelnen kann festgestellt werden:

- Mit den verwendeten flüssigen BE-Mitteln konnten ausreichende Früh- und Enddruckfestigkeiten des Spritzbetons erreicht werden (s. Bild 4.2/2).

- Die Verminderung der 28-Tage Druckfestigkeit infolge der BE-Mittel-Zugabe betrug ca. 2 % bzw. 30 % (s. Bilder 4.2/1 und 4.2/2).

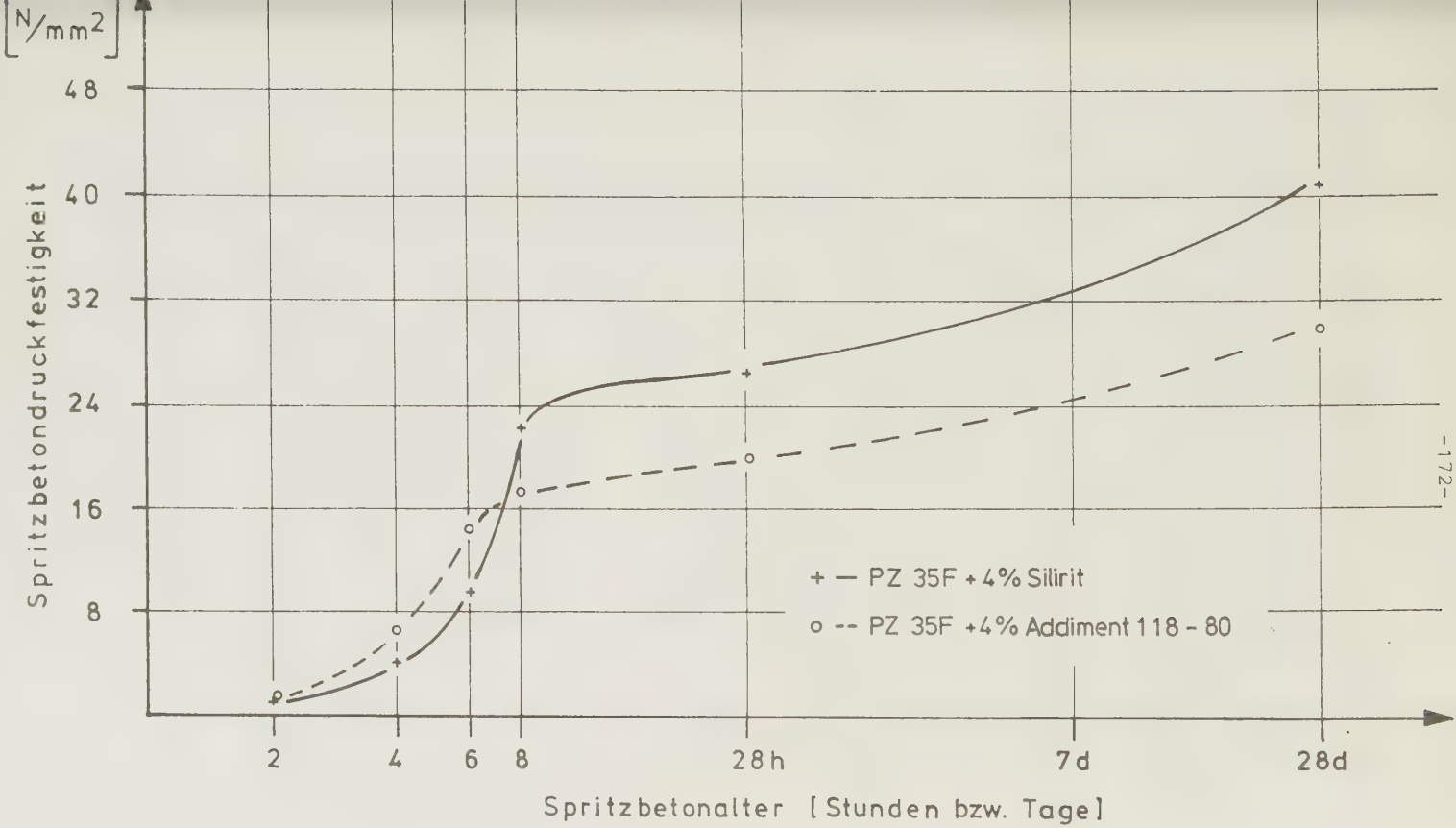


Bild 4.2/2: Druckfestigkeit des Spritzbetons in Abhängigkeit vom BE-Mittel und vom Spritzbetonalter. Der Ausgangsmischung wurde ein spezieller Kleber zugegeben.

Die Druckfestigkeit bis zu einem Spritzbetonalter von 8 h wurde mit Hilfe des Kaindl-Meyco-Gerätes [36], die der älteren Proben an Hand von Bohrkernen (Ø = 10 cm; h/d = 1) ermittelt.

Die durchgeführten Versuche haben damit gezeigt, daß bei entsprechender Spritzmaschinen- und Dosiereinrichtung (ähnlich wie sie bei den Versuchen zur Verfügung standen) das Naßspritzverfahren im Dünnstrom bei Zugabe eines flüssigen BE-Mittels und eines staubreduzierenden Klebers aus der Sicht der erzielbaren Spritzbetondruckfestigkeiten im innerstädtischen Verkehrstunnelbau eingesetzt werden kann.

(d) Die Naßspritzversuche mit der flüssigen Zugabe einer Kombination BE-Mittel/Kleber (Sigunit flüssig LVP 508-20) ergaben, daß ein solches Zugabemittel bei den vorliegenden Versuchsverhältnissen nur an der Spritzdüse, und nicht, wie hier vorgesehen, unmittelbar hinter der Spritzbetonmaschine in den Förderstrom gegeben werden darf, da sonst der Förderschlauch langsam zuwächst (Kleber). Diese Versuche mußten deshalb abgebrochen werden.

5. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse[1)]

5.1 Vorbemerkung

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse der durchgeführten Versuche gelten strenggenommen nur für die hier vorliegenden Ausgangsbedingungen, wie z.B. den Maschineneinsatz und die Spritzbetonausgangsmischung (s. Kapitel 2.2, [61]). Diese Ausgangsbedingungen wurden jedoch so gewählt, wie sie im Normalfall i.a. in der Praxis üblich sind. Es ist deshalb zu erwarten, daß bei vielen praktischen Anwendungen die hier gewonnenen Versuchsergebnisse bestätigt werden.

5.2 Herstellung von Spritzbeton in Druckluft

(1) Auslegung der Kompressoren (s. Kapitel 2.4)

Die Kompressoren zur Bereitstellung ausreichender Arbeitsluft für das Spritzen in Druckluft müssen unter Berücksichtigung des zu überwindenden Tunnelinnendruckes dimensioniert werden. Dies bedeutet, daß sie für einen Förderdruck ausgelegt werden müssen, der dem üblichen Förderdruck, wie er beim Spritzen in der Atmosphäre erforderlich ist, entspricht, zuzüglich dem jeweiligen Überdruck im Tunnel.

(2) Aufstellung der Spritzbetonmaschine

Eine normale Spritzbetonmaschine kann ohne Zusatzmaßnahmen im Druckluftbereich eingesetzt werden. Dabei ist der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine wie beim Spritzen in der Atmosphäre einzustellen. Bei der Aufstellung der Spritzbetonmaschine in der Atmosphäre vor der Druckschleuse und Verlegung der Spritzbetonförderleitung durch die Druckwand in den Drucklufttunnel ist der erforderliche höhere Förderdruck an der Maschine (zur Überwindung des jeweiligen Tunnelüberdruckes) zu

---

1) Alle Angaben gelten für das Trockenspritz-Verfahren, wenn nicht ausdrücklich das Naßspritz-Verfahren genannt wird.

berücksichtigen. Ohne Zusatzmaßnahmen z.B. an den Dichtungen der Spritzbetonmaschine wird hierdurch die maximal erreichbare Förderlänge unter Druckluft im Vergleich zu den Verhältnissen unter atmosphärischen Bedingungen verkürzt. Durch den stationären Standort und die kürzere Förderlänge ist ein derartiger Einsatz herkömmlicher Spritzbetonmaschinen begrenzt.

(3) Erzielung ausreichender Spritzbetondruckfestigkeiten in Druckluft

Spritzbeton kann in Druckluft mit gleicher Druckfestigkeit wie in der Atmosphäre hergestellt werden.
Voraussetzung hierfür sind

- die Verwendung einer üblichen Spritzbetonausgangsmischung (z. B. Sieblinie B, Zement PZ 35 F, Zementgehalt ca. 350 kg/m³ Ausgangsmischung)

- die Vermeidung von größeren Druckluftschwankungen bzw. Druckluftabfällen des Tunneldruckes (Umgebungsluftdruckes) in den ersten ca. 16 Stunden nach dem Spritzen (siehe (5)).

- ein ausreichender Förderdruck an der Spritzbetonmaschine (siehe (1) und Kapitel 2.4.1)

(4) Verringerung der Luftdurchlässigkeit der Spritzbetonschale

Um die Luftverluste im Drucklufttunnel möglichst gering zu halten, sollte die Spritzbetonschale weitgehend luftdicht sein. Die Gasdichtigkeit der Spritzbetonschale kann u.a. positiv beeinflußt werden durch:

- die Zusammenstellung der Spritzbetonausgangsmischung. Hierbei empfiehlt es sich zumindestens die allgemein bekannten Grundsätze für die Herstellung von wasserundurchlässigem Beton zu beachten und die verwendeten Betonzusatzmittel im Hinblick auf die Gas-

dichtigkeit des Betons durch Eignungsversuche zu prüfen

- eine Nachbehandlung des Spritzbetons
  Eine Nachbehandlung des Spritzbetons kann z.B. durch das Aufsprühen von Wasser erfolgen, um so ein Austrocknen und damit eine Erhöhung seiner Luftdurchlässigkeit zu verhindern. Ein anfänglich nahezu luftdichter Beton kann durch eine anhaltende Luftdurchströmung austrocknen und dadurch seine Luftdurchlässigkeit vervielfachen (s. Kapitel 2.8)
- einen geringen Differenzdruck
  Mit wachsendem Differenzdruck zwischen Spritzbetonober- und unterseite nimmt die Luftdurchlässigkeit der Spritzbetonschale zu (s. Kapitel 2.8). Die Wasserhaltung durch Druckluft sollte deshalb mit so geringem Luftüberdruck wie möglich durchgeführt werden.

(5) Maßnahmen gegen die schädigende Wirkung von Druckabfällen

Eine Absenkung des Tunnelluftdruckes (Druckabfall) führt zu Schäden am sehr jungen Spritzbeton. So wurde z.B. die Druckfestigkeit von Spritzbetonproben im Sohl- und Ulmenbereich infolge eines Druckabfalles in den ersten 4 Stunden nach dem Spritzen bis zu maximal ca. 50 % vermindert (s. Kapitel 2.7.3). Spritzbeton im Firstbereich kann u.U. bei einem Druckabfall in dieser Zeit zu Boden stürzen. Solche Druckabfälle können in der Praxis im wesentlichen

- durch Unfälle an der Schleuse,
- Ausbläser oder
- Senken des Druckes aus betrieblichen Gründen

auftreten.

Ursache der festgestellten Schäden am jungen Spritzbeton in den genannten Fällen ist die Überschreitung seiner Zugfestigkeit (s. Kapitel 2.7.4.3). Um die Schäden am jungen Spritzbeton infolge eines Druckabfalles zu vermeiden bzw. gering zu halten, bestehen im wesentlichen folgende Möglichkeiten:

- Hohe Frühfestigkeit
  Eine gleichmäßige, hohe Frühfestigkeit des Spritzbetons sollte sicher erreicht werden können, um den gefährdeten Zeitbereich (bis maximal etwa 16 Stunden nach dem Spritzen) zu verkleinern bzw. die Schäden gering zu halten. Voraussetzung hierfür sind

  . die Wahl eines geeigneten BE-Mittels,
  . eine gut funktionierende BE-Mittel-Dosiereinrichtung und
  . Frühfestigkeitsversuche, die Aufschluß über die erreichbare Festigkeitsentwicklung in den ersten Stunden nach dem Spritzen geben.

- Stützung der Spritzbetonschale
  Alle Maßnahmen wirken sich günstig aus, die der Spritzbetonschale einen besseren Halt geben, wie z.B. das frühzeitige Einspritzen von Bewehrungsmatten und das Aufstellen von Bögen. Diese Maßnahmen erhöhen insbesondere auch die Arbeitssicherheit des Personals vor Ort, da hierdurch die Gefahr von z.B. herabfallendem Spritzbeton aus dem Firstbereich vermindert wird

- Keine vorzeitige Absenkung des Luftdruckes
  Eine Absenkung des Luftdruckes im Tunnel sollte aus betrieblichen Gründen erst ca. 16 Stunden nach dem letzten Spritzbetonauftrag bzw. erst bei einer Druckfestigkeit von ca. 10 N/mm^2 vorgenommen werden.

5.3 Verminderung der Staubentwicklung beim Betonspritzen im Spritzdüsenbereich

Vorbemerkung:

Nach der Druckluftverordnung [2] muß die Arbeitskammer (Drucklufttunnel) sauber und frei von gesundheitsschädlichen Stäuben gehalten werden. Die nachfolgend aufgeführten Versuchsergebnisse sollen deshalb helfen, den Staub im Spritzdüsenbereich beim Betonspritzen so gering wie möglich zu halten:

(1) Eigenfeuchte der Spritzbetonausgangsmischung
Im Bereich der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 2 % bis 4 % (üblicher Baustellenbereich) nimmt die Feinstaubkonzentration mit wachsender Eigenfeuchte im Spritzdüsenbereich zu (s. Bild 3.2/3).

Eine Verminderung der Staubbelastung im Spritzdüsenbereich durch sogenannte Vorbefeuchtungsanlagen, die die Ausgangsmischung kurz vor der Aufgabe in die Trockenspritzmaschine vornässen, ist bei normalem Baustellenbetrieb deshalb nicht zu erwarten.

Unter Berücksichtigung auch der Staubentwicklung an der Spritzbetonmaschine und der Verarbeitbarkeit des Materials sollte die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung ca. 3 % betragen.

(2) Ort der Wasserzugabe (an der Düse bzw. Vorbenetzung)
Der Einsatz einer Vorbenetzung (Wasserzugabe 3 - 4 m vor der Düse im Förderschlauch) ohne Kleberzugabe (s. Punkt (5)) erhöht die Staubkonzentration im Spritzdüsenbereich gegenüber der Wasserzugabe an der Düse. Der Einsatz einer Vorbenetzung erscheint deshalb (wenn kein Kleber zugegeben wird) zur Staubreduzierung nicht sinnvoll. Bei der Zugabe des untersuchten Klebers bietet die Vorbenetzungseinrichtung jedoch erhebliche Vorteile (s. Punkt (5)).

(3) Wahl des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine
Mit wachsendem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine steigt auch der erforderliche Luftmengenbedarf bei der Spritzbetonförderung. Der größere Luftmengenbedarf führt im Bereich der Spritzdüse durch die dort ebenfalls größere expandierende Luftmenge zu einer stärkeren Verwirbelung der Feinstaubanteile des Spritzbetons. Dies verursacht eine erhöhte Feinstaubkonzentration im Düsenbereich (s. Bild 3.2/5). Der Förderdruck sollte deshalb auch im Hinblick auf einen geringen Rückprall nicht zu hoch eingestellt werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß der Abstand Spritzdüse/Auftragungsfläche im optimalen Bereich von ca. 1 m bis 2 m eingehalten wird.

(4) Zugabe von BE-Mitteln
Bei Verwendung einer Ausgangsmischung mit einer Eigenfeuchte von ca. 2 % bis 4 % (üblicher Baustellenbereich) kann durch die Zugabe eines geeigneten BE-Mittels die Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich reduziert werden (s. Bild 3.2/9). Da dies nicht generell gilt, sollten im Einzelfall die Angaben der Hersteller durch entsprechende Versuche überprüft werden.

(5) Zugabe eines speziellen Klebers in die Spritzbetonausgangsmischung
Die Zugabe eines speziellen Klebers (Silipon SPR 6)

in die Spritzbetonausgangsmischung (nicht z.B. mit der Kelle an der Spritzbetonmaschine) verringert erheblich die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich. In Verbindung mit einer Vorbenetzung konnte bei einer Kleberzugabe von 3 ‰ bzw. 1,5 % des Zementgewichtes die Feinstaubkonzentration bis zu ca. 90 % bzw. 60 % reduziert werden (s. Kapitel 3.2). Wenn die Wasserzugabe an der Düse erfolgte, war eine Verringerung der Feinstaubkonzentration im günstigsten Fall bis ca. 70 % möglich (Kleberzugabe 3 % des Zementgewichtes).

Zu beachten ist jedoch, daß der Kleber die Frühfestigkeit des Spritzbetons u. U. erheblich vermindert. Dies ist abhängig vom verwendeten BE-Mittel und Zement (PZ oder HOZ). Bei Portlandzementen (PZ) ist der Abfall der Frühfestigkeit i.a. geringer als bei Hochofenzementen (HOZ). Bei der Verwendung eines BE-Mittels ist seine Reaktion mit dem Kleber entscheidend. So konnte z.B. im Spritzbetonalter von 8 Stunden eine Verminderung der Druckfestigkeit durch die Kleberzugabe bei der Wahl eines wenig geeigneten bzw. besser geeigneten BE-Mittels um ca. 60 % bzw. ca. 15 % festgestellt werden.

Die 28 Tage Druckfestigkeiten werden u. U. durch eine Silipon-Zugabe um ca. 20 % verringert. Der Kleber sollte zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen im Spritzdüsenbereich nur dann zuzugeben werden, wenn ausreichende Festigkeiten erzielt werden (Eignungsprüfung).

(6) Das Naßspritzverfahren als Alternative zum Trockenspritz-Verfahren

Das Naßspritz-Verfahren (im Dünnstrom) bietet gegenüber dem Trockenspritz-Verfahren im Hinblick auf die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich bei einem W/Z-Wert von z.B. 0,4 (üblicher Wert) Vorteile. Die Feinstaubkonzentration liegt hier gegenüber dem Trockenspritzen um

ca. 70 % niedriger (s. Kapitel 3.2 (5)). Bemerkenswert ist, daß diese geringe Staubkonzentration ohne Zusatzmittel erreicht wird. Die Frühfestigkeiten des mit dem Naßspritz-Verfahren hergestellten Spritzbetons können auch in ausreichender Größe erreicht werden (s. Kapitel 4). Das Naßspritz-Verfahren im Dünnstrom kann deshalb - wenn baubetriebliche Schwierigkeiten ausgeschlossen werden können - mit $W/Z \geq 0{,}4$ als wenig Staub verursachendes Spritz-Verfahren eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

[1] DIN 18551, Juli 1979, Spritzbeton, Herstellung und Prüfung. Abgedruckt in Beton 30 (1980) H. 5, S. 185-188

[2] Verordnung über Arbeiten in Druckluft (Druckluftverordnung) vom 4. Oktober 1972

[3] Wollmann G.:
Spritzbeton im Tiefbau - Entwicklung und heutiger Stand, Zement u. Beton, Nr. 78/79 (1975), S. 1-16

[4] Spang, J.:
Technik und Anwendung von Spritzputz und Spritzbeton, Straßen- und Tiefbau, 24. Jahrg., 1970, H. 9, S. 792-798

[5] Hehn, K.H.:
Messung der Geschwindigkeit eines mit Preßluft beförderten Kies-Sand-Gemisches, Meßtechnische Briefe 2 (1968), S. 28-29

[6] Lutsch, H.:
Neue Erkenntnisse zum Auftragen des Spritzbetons - ein Beitrag zur Technologie des Spritzbetons -, Dissertation Universität Innsbruck, 1978

[7] Dahms, J.:
Spritzbeton - Anforderungen, Zusammensetzung, Überwachung, beton 10 (1973), S. 441-445

[8] Ruffert, G.:
Betonspritzverfahren zum Schutz unterirdischer Bauten, Tiefbau 15 (1973), H. 3, S. 213-216

[9] Schwanda, F.:
Spritzbeton und Betonspritzmaschinen, Beton 7 (1962), S. 293-298

[10] Bonzel, J.:
Beton bestimmter Festigkeit, Zement-Taschenbuch 1979/80, S. 279-314

[11] Walz, K.:
Über die Herstellung von Beton höchster Festigkeit, Beton (1966), H. 8, S. 339-340

[12] Jakubaschke, O.:
Grundlagen der Pneumatik, 1978, Krausskopf-Verlag

[13] Weber, M.:
Strömungsfördertechnik, Krausskopf-Verlag, 1974

[14] Weber, M.:
Pneumatisches Fördern, dhf 6/68, S. 51-57

[15] Günther, W.:
Untersuchungen über die Druckverluste in pneumatischen Förderleitungen und Beitrag zur Berechnung der Druckverluste mit besonderer Berücksichtigung des Fördervorganges im Beharrungszustand, Dissertation, Karlsruhe, 1957

[16] Muschelknautz, E.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht, VDI-Forschungsheft 476, 1959

[17] Wagon,H.:
Zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit von Schüttgütern in pneumatischen Förderanlagen, VDI-Zeitschrift Bd. 92, Nr. 21, Juli 1950, S. 577-580

[18] Gasterstädt, J.:
Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorganges, Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens,H. 265, VDI-Verlag, 1924

[19] Waffentechnisches Taschenbuch, Herausgeber Rheinmetall GmbH, Düsseldorf, 1973

[20] Rapp, R.:
Stahlfaserspritzbeton im Bergbau und Tunnelbau, Glückauf-Betriebsbücher, Bd. 20, 1979

[21] Rizk, F.:
Pneumatische Förderung von Kunststoffgranulaten in horizontalen Rohrleitungen unter Berücksichtigung des Gewichtseinflusses in Zusammenhang mit Gut- und Rohrwerkstoffeigenschaften, insbesondere im optimalen Förderbereich, Dissertation Karlsruhe, 1973

[22] Bohnet, M.:
Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Absetzen, das Aufwirbeln und den Transport feiner Staubteilchen in pneumatischen Förderleitungen, VDI-Forschungsheft 507, 1965

[23] Atlas Copco Handbuch, Druckluft-Technik, 1977

[24] DIN 1045, Beton und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung, Ausgabe Dezember 1978

[25] Wierig, H.J.:
Herstellen, Fördern und Verarbeiten von Beton, Zementtaschenbuch 1979/80, S. 255-277

[26] Nischer, P.:
Austrocknen von jungem Beton, Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1976, H. 3, S. 117-120 und H. 4, S. 180-184, H. 5, S. 242-246

[27] Zantz, E.:
Die Vakuumbehandlung von Beton, Tiefbau, 18. Jahrg., 1976, Nr. 10, S. 684-694

[28] Kreitmeyer, H.:
Vakuum verkürzt Ausschalfristen, Beton, Nr. 10, 1974, S. 392-398

[29] Linder, R.:
Stichwort: Spritzbeton, Bauverlag 1976

[30] Gerike, K.:
Die Wirkung einer Vakuumbehandlung auf die Betoneigenschaften, Beton, Nr. 5, S. 166-169, 1975

[31] Locher, F.W., Wischers, G.:
Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins, Zement-Taschenbuch 1979/80, S. 49-64

[32] Wischers, G., Manns, W.:
Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton, Beton, 1973, Nr. 4, S. 167-171 und Nr. 5, S. 222-228

[33] Wierig, H.-J.:
Eigenschaften von "grünem, jungem" Beton: Druckfestigkeit-Verformungsverhalten-Wasserverdunstung, Beton, 1968, Nr. 3, S. 94-101

[34] Wierig, H.-J.:
Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von "grünen" und "jungen" Betonen und denen des Festbetons, Beton, 1971, Nr. 11, S. 445-448 und Nr. 12, S. 487-490

[35] Weigler, H., Karl, S.:
Junger Beton: Beanspruchung - Festigkeit - Verformung, Betonwerk + Fertigteil-Technik 1974, H. 6, S. 392-401 und H. 7, S. 481-484

[36] Kaindl, F.:
Zur Güteprüfung der Frühfestigkeit von Spritzbeton, Tonind.-Ztg. 90 (1966), Nr. 6, S. 264-269

[37] Alexanderson, J.:
Physikalische Wirkungen bei der Warmbehandlung von Beton, Betonwerk + Fertigteiltechnik, 1972, H. 12, S. 885-887

[38] Walz, K.:
Undurchlässiger Beton, Bautechnik-Archiv, 1956, H. 13

[39] Graf/Albrecht/Schäffer:
Die Eigenschaften des Betons, 1960, Springer-Verlag,

[40] Haegermann, H.:
Wasserundurchlässiger Beton - Anforderungen und Herstellung, Tiefbau, 21. Jahrg., 1979, H. 6, S. 503-513

[41] Walz, K.:
Grundlagen und praktische Bedeutung der Undurchlässigkeit des Betons gegen Flüssigkeiten, Bau + Bauindustrie 1968, H. 3, S. 122-129 und H. 4, S. 240-243

[42] Wesche, K.:
Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 2, Beton, Mauerwerk, 1974, Bauverlag

[43] Rehm, G., Zimbelmann, R.:
Untersuchung der für die Haftung zwischen Zuschlag und Zementmatrix maßgebenden Faktoren, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 283, 1977

[44] Hallenbach, F.:
Die Durchlässigkeit poröser Gesteine und ihre Bestimmung, Oel und Kohle Nr. 1, 1. Jahrg., 1943

[45] Engelhardt, v. W.:
Der Porenraum der Sedimente, Springer-Verlag 1960

[46] Terschüren, W.:
Zur Gasdurchlässigkeit von Sedimentgestein des Ober-Karbons, Dissertation, TH Aachen, 1978

[47] Klinkenberg, L. J.:
The Permeability of Porous Media of Liquids and Gases, Drilling and Production Practice, Am. Petr. Inst. (1941)

[48] VDI-Richtlinie 2262 "Staubbekämpfung am Arbeitsplatz", Dezember 1973

[49] Schütz, A., Heidermanns, G.:
Gesundheitsgefährliche Stäube im Hoch- und Tiefbau, Staub-Reinhalt. Luft 37 (1977), Nr. 7, S. 273-277

[50] Kaufmann, E.:
Staubbekämpfung und Belüftung, Vortrag auf der Fachtagung der Tiefbau-Berufsgenossenschaft "Sicherheit bei Anwendung der Spritzbetonbauweise im Tunnelbau" in St. Englmar im Juli 1979, abgedruckt in Sonderdruck der TBG "Spritzbetonbauweise auf Baustellen unter Tage"

[51] Winkel, A.:
Messung und Beurteilung von Staubkonzentrationen am Arbeitsplatz mit besonderer Berücksichtigung der Verwendung verschiedener Staubmeßgeräte, Staub-Reinhalt. Luft 28 (1968), Nr. 1, S. 1-7

[52] Kaphun, K., Kaufmann, E., Becker, H., Bauer, H.D., Vorherr, E., Peterson, E.:
Die Belüftung von Baustellen unter Tage, Tiefbau-BG 4/1975, S. 165-190, 6/1975, S. 290-320

[53] Sutter, E.:
Staubmessungen beim Auftragen von Spritzbeton (Gunit, Torkret) in Untertagebauten, Staub-Reinhalt. Luft 31 (1971), Nr. 2, S. 56-57

[54] Ramisch, H.:
Spritzbetonsicherung im Hohlraumbau, Sonderdruck aus Tiefbau-BG, 2/75 und 11/76

[55] Empfehlungen zur Messung und Beurteilung von gesundheitsgefährlichen Stäuben, herausgegeben vom Staubforschungsinstitut des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Bonn und dem Silikose-Forschungsinstitut der Bergbau-Berufsgenossenschaft, Bochum, Staub-Reinhalt. Luft 33 (1973), Nr. 1, S. 1-3

[56] Kaufmann, E.:
Staubmessungen auf Untertagebaustellen - Gesichtspunkte zur Auswahl der Staubsammelgeräte, Tiefbau-BG 8/1975, S. 422-424

[57] Coenen, W.:
Ein neues Meßverfahren zur Beurteilung fibrogener Stäube am Arbeitsplatz, Staub-Reinhalt. Luft 33 (1973), Nr. 3, S. 99-103

[58] Coenen, W.:
Feinstaubmessung mit dem VC 25, Neuere Untersuchungen und praktische Erfahrungen, Staub-Reinhalt. Luft 35 (1975), Nr. 12, S. 452-458

[59] Weber, M./Schauki, N.:
Pneumatische und hydraulische Förderung, Aufbereitungstechnik Nr. 10/1967, S. 549 - 558

[60] Wischers, G./Krumm, E.:
Zur Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln, beton 8 (1975), S. 279 - 318 und beton 9 (1975), S. 351 - 355

L e b e n s l a u f

1947	am 13. Juli in Hildesheim geboren als Sohn des Holzkaufmanns Wilhelm-Friedrich Schreyer und seiner Ehefrau Ute, geb. Fiedler
1954 - 1958	Besuch der Volksschule in Bonn
1958 - 1967	Besuch des mathematisch-naturwissenschaftlichen Ernst-Moritz-Arndt-Gymnasiums in Bonn mit Abschluß der Reifeprüfung (Abitur)
1967 - 1969	Bundeswehr (Wehrpflicht)
1969 - 1974	Studium des Bauingenieurwesens an der TH - Aachen; Abschluß: Dipl.-Ing.
seit 1975	Angestellter der STUVA, Köln
	Ich bin seit 1974 verheiratet und habe einen Sohn

Druck: FM-Druck, Eiler Str. 63, 5000 Köln 91